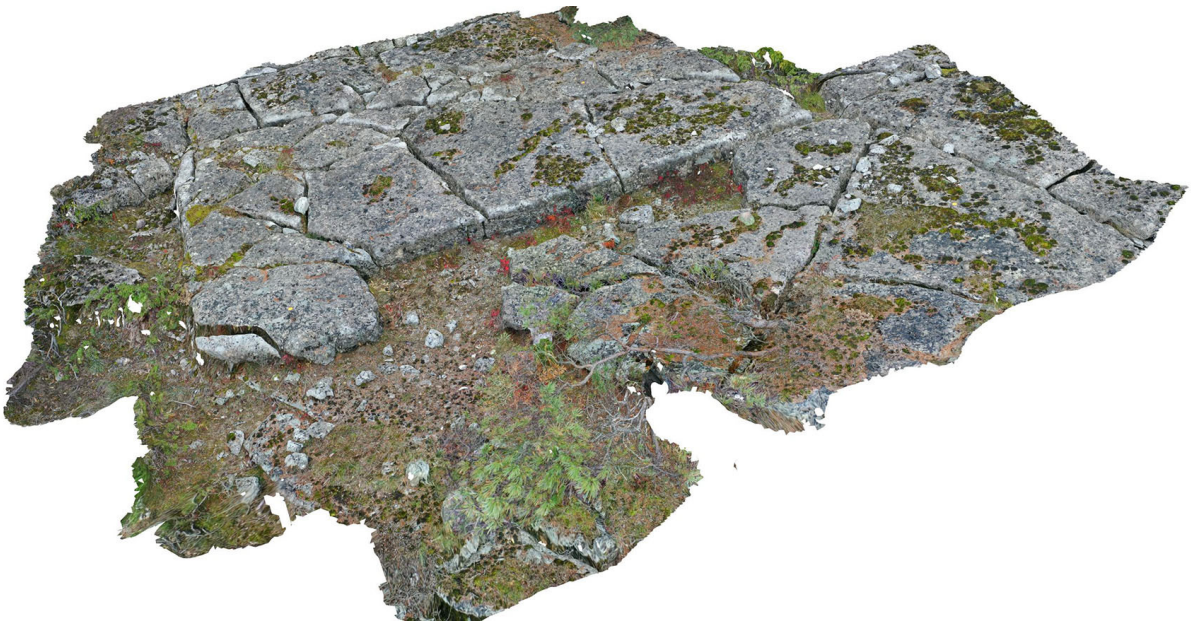
Karaktärisering av karst på Gotland – en pilotstudie på mellersta Gotland

Mikael Erlström, Peter Dahlqvist, Daniel Sopher & Carl-Erik Hjerne

april 2022

SGU-rapport 2022:04



SGU Sveriges geologiska undersökning

Omslagsbild: 3D-modell av karsthällmark vid Sigsarve på mellersta Gotland skapad genom fotogrammetri. Illustratör: Daniel Sopher

Författare: Mikael Erlström, Peter Dahlqvist,
Daniel Sopher och Carl-Erik Hjerne
Granskad av: Björn Holgersson
Ansvarig enhetschef: Jakob Levén

Redaktör: Johan Sporrong

Sveriges geologiska undersökning
Box 670, 751 28 Uppsala
tel: 018-17 90 00
e-post: sgu@sgu.se

www.sgu.se

INNEHÅLL

Sammanfattning 4
Inledning 6
Syfte och genomförande 7
Beskrivning av karst och karststrukturer 8
Karst i Sverige 9
Karststrukturer 12
Andra definitioner 16
Karst och hydrogeologi 16
Metodik 20
Beskrivning av pilotområdena 20
Mallgård 20
Bjärges 20
Sigsarve 20
Tjärdal 20
Dokumentation av karst med drönare 22
Nederbördsdata – nivåmätningar med loggrar 26
Resultat 28
Dokumentation med drönare 28
Karstskrevor och karrenhålens längd och bredd 28
Karstskrevornas och växtlinjernas orientering 28
Resultat från fältkartläggning 35
Nederbörd – vattennivåer 39
Diskussion 46
Slutsatser 49
Referenser 50

SAMMANFATTNING

Med karst avses landskap och landformer som skapats genom korrosion av karbonathaltig berggrund. Förekomsten av karst på Gotland har förutom en betydelsefull roll för de hydrogeologiska förhållandena även ett stort naturvärde med sin speciella fauna och flora. En ökad kunskap om karst bedöms ha en stor betydelse för förståelsen av grundvattenbildning och rumsliga variationer av grundvattenförhållandena på Gotland.

Allmänt finns ett samband mellan topografi, kalkstenens uppbyggnad och förekomsten av karst. Inom höjdområdet från Visby upp mot Bunge, som består av kalkstensformationerna Högklint och Slite, samt höjdområdet på mellersta Gotland med Klinteberg-Hemsekalksten är karst relativt vanligt. Även nere på Sudret finns lokalt karst i områden med Hamra-Sundrekalksten.

Huvuddelen av karstvittringen bedöms vara äldre än holocen (11 700 år) eftersom vi ser tecken på glacial erosion av karsthällmarkerna, så kallad glaciokarst. Även äldre modellberäkningar från Lummelunda indikerar att tidrymden efter det att Gotland steg ur havet för cirka 10 000 år sedan inte varit tillräcklig. Karstvittringen bör därför redan inletts under varmare perioder i pleistocen (en geologisk epok från cirka 2 580 000 år till för 11 700 år sedan), men den kan även påbörjats ännu tidigare.

Vanligaste typen av karst på Gotland är ytnära karst (epikarst) som utvecklas i den omättade zonen. Typiska exempel är de karstskrevor som skapats genom att meteoriskt vatten löst upp kalkstenen i anslutning till sprickor. Förekomsten av epikarst är dock inte systematiskt dokumenterad på Gotland. Det saknas även kunskap om hur och i vilken omfattning epikarsten påverkar de hydrogeologiska förhållandena.

Den här rapporten redovisar bland annat försök med dokumentation av epikarst i fyra mindre pilotområden på mellersta Gotland. Totalt dokumenterades drygt 18 hektar karsthällmark med hjälp av drönare. Med databearbetning och tolkning av cirka 3 500 strukturer gjordes en statisk utvärdering av bredd, längd, orientering och andelen öppna karststrukturer. Mellan två och sex procent av de kartlagda hällområdena består av öppna karstskrevor. Medelbredden för sprickorna är sju centimeter och 90 % av sprickorna är kortare än fem meter. Karstskrevornas orientering är mestadels ostnordostlig och västnordvästlig men det finns en stor variation mellan pilotområdena. Försöken med drönare visar att tekniken möjliggör effektiv dokumentation av karsthällmarker.

Resultat från vattennivåmätningar i karstskrevor svarade tydligt mot nederbördsdata från vår mätstation vid Ardre och SMHI:s station i Vänge. Mätningen med nivåloggrar under 2019–2021 visar att epikarsten både håller kvar vatten och leder vatten vidare till lägre liggande områden eller ner i berggrunden. Den kvarhållande egenskapen med så kallade hängande magasin i den omättade zonen bedöms ha stor betydelse för grundvattenbildningen i dessa områden och även för att skapa ett fuktigt mikroklimat i sprickorna. Det senare är gynnsamt för de typiska växter och organismer som karaktäriserar karsthällmarker.

Förstudien pekar på behovet av ytterligare undersökningar för att få kunskap om hur djupt ner i berggrunden epikarsten går. Förslagsvis genom fältförsök med olika geofysiska metoder som VLF (Very Low Frequency) och georadar samt grunda vinklade borrhål, gärna med avgränsade sektioner. Uppföljande undersökningar av epikarstens koppling till grundvattenbildning, förekomsten av hängande magasin och till olika typer av temporära våtmarker kring karstområden bör också göras. Förekomsten av epikarst under jordlagren är också något som bör undersökas.

Rapporten redovisar även en inledande analys av vilka kalkstenstyper som är mer benägna än andra att bilda karst. Det behövs dock ytterligare analyser av lagring och texturell uppbyggnad som underlag till bedömningen av förekomsten, storleken och hur djupt framför allt epikarsten går.

En bidragande faktor till bildning av karst är också den hydrauliska gradienten som utgör differensen i grundvattennivå mellan två punkter dividerat med avståndet mellan punkterna. Modellering av hur den hydrauliska gradienten varierat sen isens tillbakadragande kan möjligen bidra till vår kunskap om hur och när karsten bildats. Likaså kan studier av den rådande hydrauliska gradienten i olika områden troligen förbättra vår kunskap om var karst har en påverkan på de hydrogeologiska förhållandena på Gotland. En viktig diskussionspunkt i framtida undersökningar är om och hur mänsklig påverkan i form av utdikning och bortledning av vatten, stora nivåsänkningar på grund av större grundvattenuttag och avsänkning kring stora kalkbrott påverkar karstsystemen och indirekt den rådande vattenbalansen i marken.

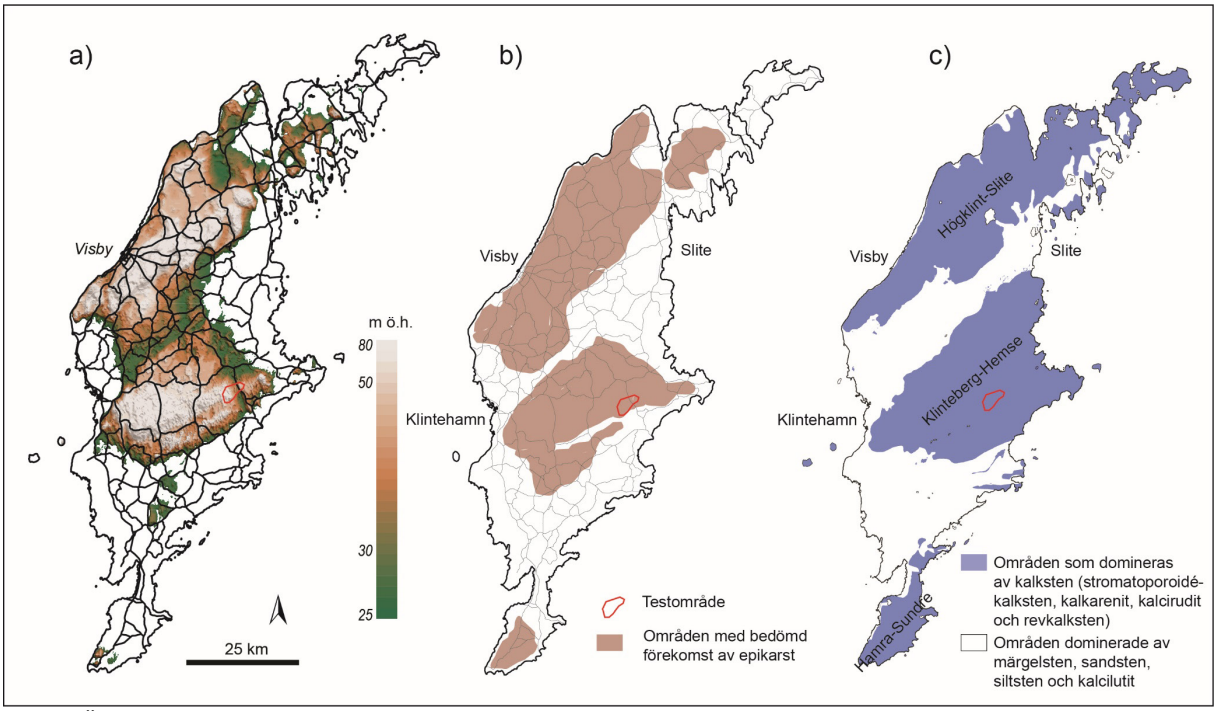
Rutiner och datavärdskap för en systematisk inlagring av uppgifter om karst är också något som bör utvecklas för att successivt få ett bättre dataunderlag om förekomst av karst på Gotland.

INLEDNING

Med karst avses landskap och landformer som skapats genom korrosion av karbonathaltig berggrund. Själva namnet karst härrör från en germansk omskrivning av det pre-indoeuropeiska ordet *kar* som betyder klippa eller hällmark och det slovenska ordet *kras* som betyder stenig mark och där Krasplatån i området mellan Slovenien och Italien utgör ett typområde för karst.

Förekomst av karst anses ha en betydelsefull inverkan på de hydrogeologiska förhållandena i berggrunden på Gotland, bland annat för grundvattenbildning och sårbarhet. Karsthällmarker har också ett stort naturvärde på grund av deras speciella betingelser, främst mikroklimat, för den fauna och flora som finns i anslutning till karst (Naturvårdsverket 2011). I Sverige påträffas karsthällmarker, kod 8240 enligt Natura Naturtypskartans kodklassificering (NNK-IT, Naturvårdsverket 2016), nästan uteslutande inom de ordoviciska och siluriska kalkstensområdena på Öland respektive Gotland samt i fjällkedjan.

Redan 1741 noterade Linné öppna sprickor, så kallade rämnor och grottor i den gotländska berggrunden. Hällområden med öppna sprickor ”rämnor” beskrevs också i samband med SGU:s kartläggning av Gotland i början på 1900-talet (Munthe m.fl. 1925). Dessa tidigare så kallade rämnor benämns idag som karstskrevor och tillhör den vanligaste typen av ytlig karst på Gotland. Lummelundagrottan och dess karstsystem, vars inre delar upptäckes under mitten av 1900-talet, är ytterligare ett bevis på hur omfattande karstvittringen även kan vara under markytan (Engh 1980). I Martebo hittade speleologer 2016 en 150 m lång grotta som kan vara ytterligare en gren till Lummelundagrottan, och vid Stenkumla cirka 8 km söder om Visby har ytterligare en mer än 18 m djup grotta kallad Trollkälda Hul hittats. I Sveriges Speleologsförbunds grottdatabas (basen.speleo.se/rel/login.php) finns ett 20-tal grottor angivna på Gotland som i varierande grad klassats som karstgrottor, men sannolikt finns det enligt lokala speleologer betydligt fler.



Figur 1. Översiktskartor som visar **a)** del av Gotland som ligger över 25 m ö.h., **b)** bedömd huvudsaklig förekomst av epikarst och **c)** var berggrunden domineras av kalksten. Högklint–Slite, Klinteberg–Hemse och Hamra–Sundre avser namnen på de dominerande stratigrafiska berggrundslagren inom kalkstensområdena. Delkartorna är modifierade från SGU:s regionala berggrundskarta över Gotland (Erlström m. fl. 2009). Testområdet med de fyra pilotområdena är markerat med röd polygon.

Vid SGU:s berggrundskartläggning av Gotland 2006–2008 noterades karstskrevor främst inom hällområden med kalksten som ligger högre än cirka 25 m ö.h. (fig. 1a–b). Dessa områden sammanfaller mer eller mindre med Högklint-Slitegruppens, Klinteberg-Hemsegruppens och Hamra-Sundregruppens kalkstensområden (Erlström m. fl. 2009, fig. 1c). Karstsprickor förekommer dock ner till +18 m ö.h. i Bungeområdet (Naturvårdsverket, Krister Mild muntlig kommunikation 16 februari 2022). Vi har även sett att förekomsten av karst tycks, förutom topografi och närvaron av sprickor, även vara knuten till speciella kalkstenstyper. Karbonatrika, kristallina, sprickiga och homogent lagrade kalkstenar är mer benägna att påverkas av karst i jämförelse med lerigare varianter. Som jämförelse finns i regel ingen karst inom områdena med märgel på Gotland.

Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU) och Naturvårdsverket (NV) har gjort översiktliga inventeringar av karsthällmark med hjälp av flygbildstolkning och stickprovskontroller, främst inom Natura 2000-områden, naturreservat och nationalparker (Glimskär m. fl. 2015, 2018). SLU:s och NV:s tolkningar av karsthällmark inom dessa områden är sammanställda i en publik GIS-tjänst (gpt.vic-metria.nu/data/naturtypskartan). Naturtypsinventeringar som visar var det finns basisk hällmark eller alvarmark (NNK-IT kod 6110 respektive 6280, Naturvårdsverket 2016) har också utförts av länsstyrelsen på Gotland (gotland.maps.arcgis.com). Som underlag till deras inventeringar har bland annat SGU:s hälldata använts. Försök har även gjorts med kartläggning av karst med hjälp av LIDAR-data (höjddata som skapats med hjälp av flygburen laserskanning) (Stocklassa-Palmlöv 2015). Metoden ger morfologiska indikationer på förekomst av större karststrukturer och områden med oregelbunden topografi som kan vara skapad av karst. Däremot är det inte möjligt att med LIDAR se förekomsten av mindre karststrukturer. LIDAR-studien visar dock att större karstobjekt företrädesvis påträffas inom samma områden som anges i figur 1 och i Erlström m.fl. (2009). För en verifiering av LIDAR-teknikens användbarhet behövs också fältkontroller av tolkade objekt (Stocklassa-Palmlöv 2015).

SLU:s, NV:s och länsstyrelsens inventeringar ger en allmän bild av var hällområden med förutsättningar för karsthällmarker finns men det behövs bättre kartor och dokumentation om förekomst, typ, relativ mängd, utseende och orientering som underlag för bedömning av bland annat grundvattenbildning, sårbarhet och förekomst av känsliga ekosystem. Riklig förekomst av ytlig karst bedöms till exempel ha stor inverkan på andelen nederbörd som bildar grundvatten, hur mycket nederbörd som hålls kvar i landskapet och hur ytavrinningen ser ut. Det behövs också bättre kunskap om hur djupt ner i berggrunden de ytliga karststrukturerna går och om det finns anslutande underjordisk karstvittring för att förstå grundvattenbildning och i förlängningen uppskattning av uttagsmöjligheterna från grundvattenmagasinen.

Syfte och genomförande

Som ett led i att öka kunskapen om förekomst av karst och dess påverkan på grundvattenbildningen påbörjade SGU därför 2019 en metodikstudie av karsthällmarker på Gotland. Arbetet har omfattat genomgång av äldre dokumentation, en beskrivning och definition av ytnära karst, test av metodik för kartläggning av karst med bland annat drönare samt mätningar av nederbörd och vattennivåer i karstsprickor. Merparten av studien har gjorts inom och i anslutning till ett antal pilotområden på mellersta Gotland där det finns stora hällmarker med tidigare noterad karst samt tillgång till resistivitetsdata (SkyTEM) från 2013 och 2015 års fältmätningar (Dahlqvist m.fl. 2015, 2017).

Fältarbetet inleddes under hösten 2019 med installation av en väderstation (nederbörd, temperatur, m.m.) och montering av så kallade nivåloggrar för kontinuerlig mätning av vattennivåer i karstsprickor. I arbetet ingick även att med drönare dokumentera karst inom pilotområdena. Under 2020 var det planerat att göra geofysiska markmätningar och test av kartläggningsmetodik. Men på grund av covidpandemin kunde tyvärr endast en mindre del av detta arbete utföras.

Rapporten ger en beskrivning av karst och hur den klassificeras och uppträder. Vidare ges en analys av karstförekomsten inom pilotområdena, resultaten från ett metodiktest för kartläggning av karst och en hydrogeologisk analys av vattennivåmätningar och nederbörd. Rapporten ger även en sammanfattande rekommendation för fortsatt arbete.

Projektgruppen har bestått av Peter Dahlqvist (projektledning, hydrogeologi), Mikael Erlström (karstkaraktärisering, berggrund), Daniel Sopher (drönarkartläggning och analys), Carl-Erik Hjerne (analys av nivåmätningar och diskussion hydrogeologi), Oskar Henriksson (väderstation, nivåmätare), och Frans Lundberg (extrageolog, kartläggningsinsats).

BESKRIVNING AV KARST OCH KARSTSTRUKTURER

Karst bildas genom kemisk upplösning (korrosion) av berggrund som består av kalksten eller dolomit, det vill säga domineras av karbonatmineral. Den kemiska reaktionen sker genom upplösning av karbonat med kolsyra som bildas genom att atmosfärens koldioxid löser sig i nederbörden. Ytterligare koldioxid tillförs även nederbörden när den kommer i kontakt med organiskt material som håller på att brytas ner i marken. Den kemiska reaktionen kan sammanfattas enligt [1].

H_20 (*nederbörd*) + CO_2 (*atmosfärisk och biogen koldioxid*) → H_2CO_3 (*kolsyra*)

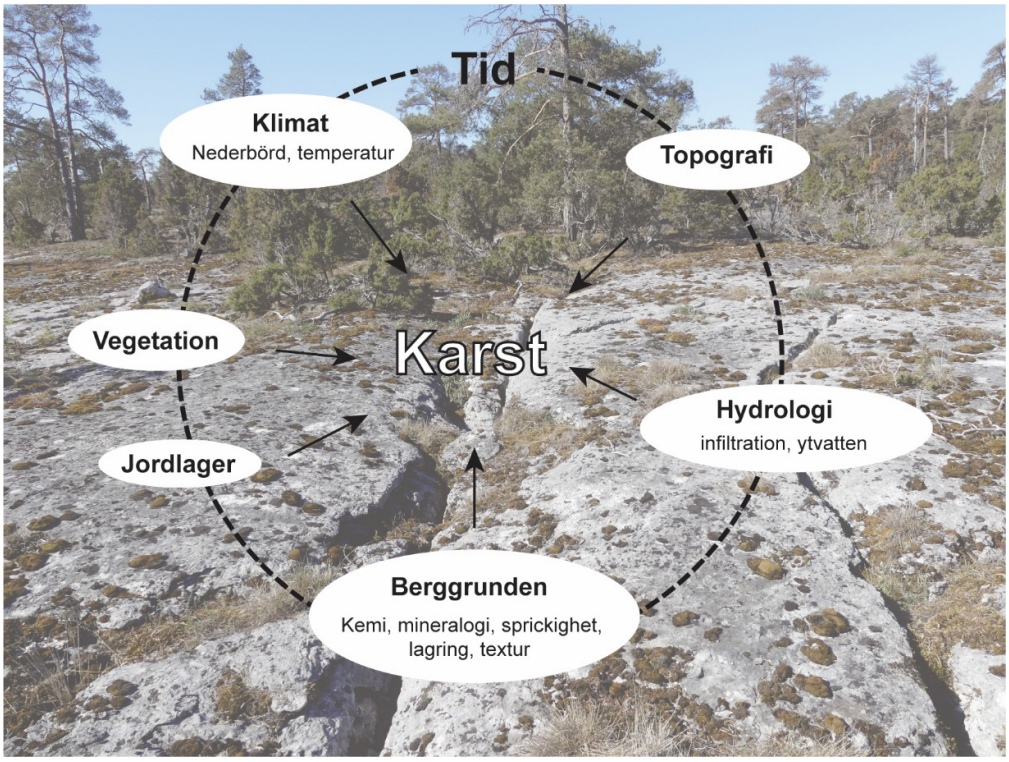
$CaCO_3$ (*kalksten*) + $H_2CO_3 \rightarrow Ca^{2+} + 2HCO^-$ [1]

I sällsynta fall kan även oxidation av sulfider i kalkstenen, vanligtvis pyrit (FeS_2), resultera i bildningen av svavelsyra som bidrar till den kemiska upplösningen. Detta sker när syrerikt vatten når syrefattig berggrund med höga sulfidhalter. Den kemiska vittringen resulterar i lösta kalciumjoner och bikarbonatjoner i det meteoriska vattnet och grundvattnet.

Hur omfattande karstvittringen blir beror på en mängd faktorer (fig. 2). Karst har bäst förutsättningar att utvecklas i homogena kalkstenar (mineralogiskt sett) med hög karbonathalt. Med ökat innehåll av lermineral och lerskikt i kalkstenen minskar dess benägenhet att utveckla karst. Detta beror bland annat på att märgel och märgelsten är mjukare och sprickorna ofta självläkande. Dessa bergarter är också tätare vilket gör det svårare för vatten att perkolera genom sådana lager. Därför är det sällsynt med karst inom märgel och märgelstensområdena på Gotland. Däremot är sprickor i den spröda kalkstenen ofta öppna och hydrauliskt konduktiva vilket bidrar till klart bättre förutsättningar för bildning av karst inom kalkstensområdena på Gotland.

Om kalkstensberggrunden täcks av mäktiga jordlager minskar däremot oftast förutsättningarna för att karst ska bildas i den underliggande berggrunden. Det beror på att nederbörden som infiltrerar marken ofta mättas med avseende på bikarbonat innan den når berggrunden, det vill säga förbrukar den lösta kolsyran i vattnet. Detta gäller speciellt i de fall när jordlagren är karbonathaltiga, vilket ofta är fallet när den underliggande berggrunden består av kalksten. Däremot kan jordlager med hög halt organiskt material (till exempel torv) främja bildningen av karst. Detta på grund av att koldioxid tillförs från nerbrytningen av det organiska materialet som ökar mängden kolsyra i vattnet. Andelen koldioxid till det meteoriska vattnet som härrör från nerbrytningen av det organiska materialet i marken är vanligtvis avsevärt större än det som kommer från atmosfären. Exempelvis kan det vara en större korrosion i öppna karstsprickor där löv, barr och humus ansamlats i jämförelse med på omgivande bar hällmark.

Förutom berggrunden och jordlagrens uppbyggnad har faktorer som nederbördsmängd, temperaturförhållanden, topografi, vegetation, ytvattenavrinning och grundvattenströmning en stor inverkar på hur karst bildas. För att karst ska utvecklas ingår även att det måste vara en viss tidsperiod med likartade gynnsamma förhållanden. Ofta anges tidsperioder på tiotusentals år.



Figur 2. Illustration av de huvudsakliga faktorerna som påverkar förekomst, utseende och omfattning av karst. Foto (Sigsarve): Mikael Erlström.

Karst i Sverige

I förhållande till andra länder påträffas karst i en mycket begränsad del av svensk berggrund eftersom det endast finns mindre områden med karbonatbergarter där karst kan utvecklas. I den svenska fjällkedjan påträffas karst spritt i kalkstensförekomster i skollberggrunden. Kända förekomster med bland annat grottbildning och doliner finns kring Torne Träsk i Norrbotten (fig. 3b), Artfjället och Överuman i södra Västerbotten och i Bjurälvens dalgång i nordvästra Jämtland (fig. 3d). Fjällkedjans karst- och grottbildningar finns beskrivna i arbeten av Svenonius (1910), Helldén (1973), Tell (1973) och Sjöberg (1980). Karstområdet utmed Bjurälven har också varit vinnare i tävlingen Geologiskt Arv 2014 (Länsstyrelsen i Jämtlands län 2017).

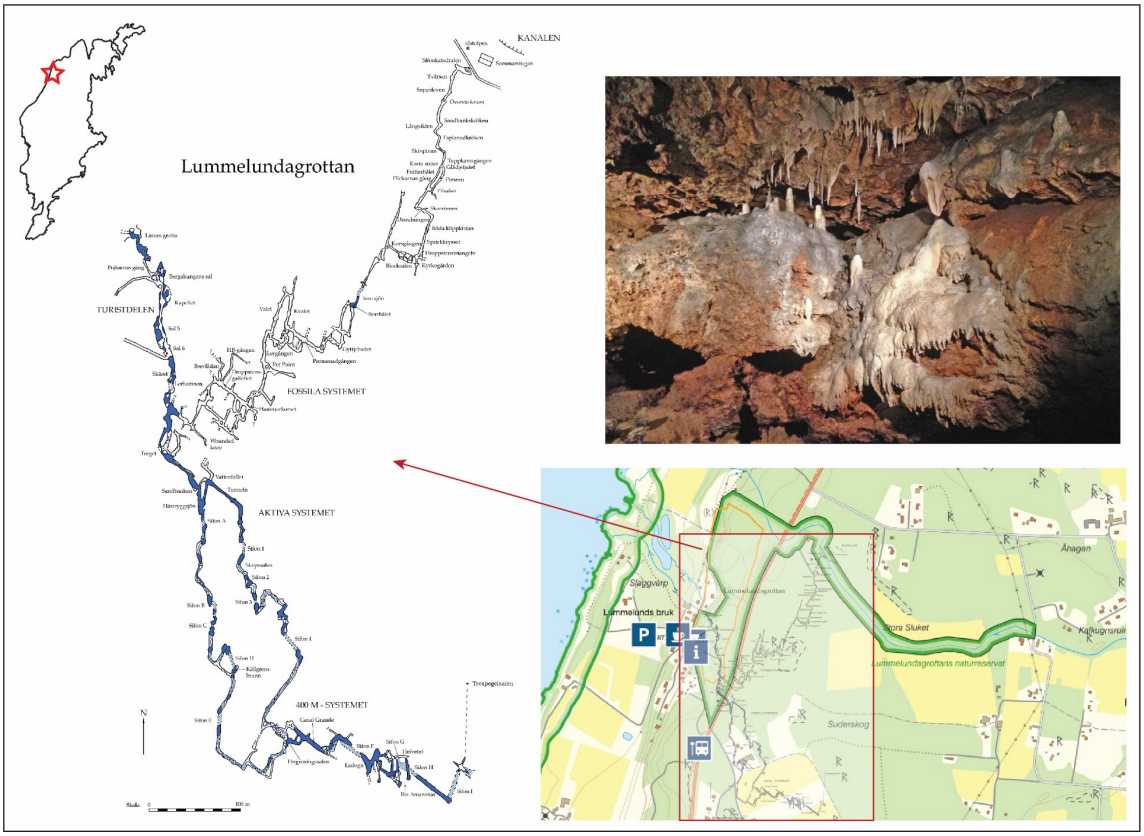
Karst påträffats också i nordöstra Skånes kritberggrund, exempelvis har grottor och doliner (se definition i tabell 1) hittats på Listerlandet (fig. 3c) och väster om Råbelövssjön norr om Kristianstad där Balsbergsgrottan utgör en av Sveriges större grottbildningar (Hageltorn 1963, Persson 1963, Åkerman 1995, Persson 2009). Doliner har också påträffats längs med Nävlinge-åsens norra kant (Tell 1973, Von Knorring 2013). På Öland påträffas karst som korroderade och vidgade sprickor i kala hällområden på Alvaret (fig. 3a). Mest kända är dock karstförekomsterna på Gotland med bland annat Lummelundagrottan som den mest studerade karststrukturen i Sverige (Lundevall 1965, Engh 1980). Hittills har man utforskat ett cirka fyra kilometer långt grottsystem (fig. 4). Besöksdelen är endast en liten del av det totala grottsystemet.

Det är inte helt enkelt att bestämma när dessa karststrukturer bildades. Sannolikt har flertalet av de svenska karstförekomsterna inte enbart bildats från kemisk vittring under holocen tid, det vill säga under de senaste cirka 11 000 åren efter senaste nedisningen, utan det är troligt att karstifieringen påbörjades redan under relativt varmare interstadialer under pleistocen. Detta har bland annat nämnts angående karstförekomsterna i Estland (Koit 2018). Det är heller inte osannolikt att karsten även härstammar från neogen eller paleogen tid då klimatet var avsevärt fuktigare och varmare än idag (fig. 5).

Figur 3. Exempel på svensk karst. **a)** Karrenfält på Ölands Alvar (6269625/595197) **b)** Slukhål och dolinlandskap i Vindelälvens naturreservat (7333560/543699) **c)** Dolin på Listerlandet (6208916/484527) **d)** Blinda dalen, Bjurälvens naturreservat (7199213/456113). Foto: Peter Dahlqvist (3a), Reinhart Greiling (3b), Mikael Erlström (3c), Rolf Engh (3d).

Lundvall (1965) skriver att grottsystemet i Lummelunda mestadels utformats under de senaste 4 000 åren medan Tell (1964) tolkar ett preglacialt ursprung. Engh (1980) anser också att karstvittringen och bildningen av Lummelundagrottan startade under preglacial tid, möjligtvis under någon pleistocen interstadial. Tankar om att karst bildats även under inlandsisen har också framförts. Men enligt Svantesson (1976) var landisen fastfrusen vid underlaget och det saknas då fritt cirkulerande vatten vilket är förutsättningen för bildning av karst.

För att ett karstlandskap ska utvecklas krävs att det råder likartade gynnsamma förhållanden under en längre period. Beroende på klimatiska faktorer kan det röra sig om tiotusentals år, speciellt i kallare regioner. För cirka 11 500 år sedan, i samband med senaste landisens avsmältning började de mest höglänta delarna, som i dag ligger över cirka 60 m ö.h., av Gotland exponeras. Relativt snabbt ökade Gotland i storlek till att omfatta landområden > 35 m ö.h., det vill säga motsvarande områden över Ancylussjöns strandlinje för cirka 10 200 år sedan. Under

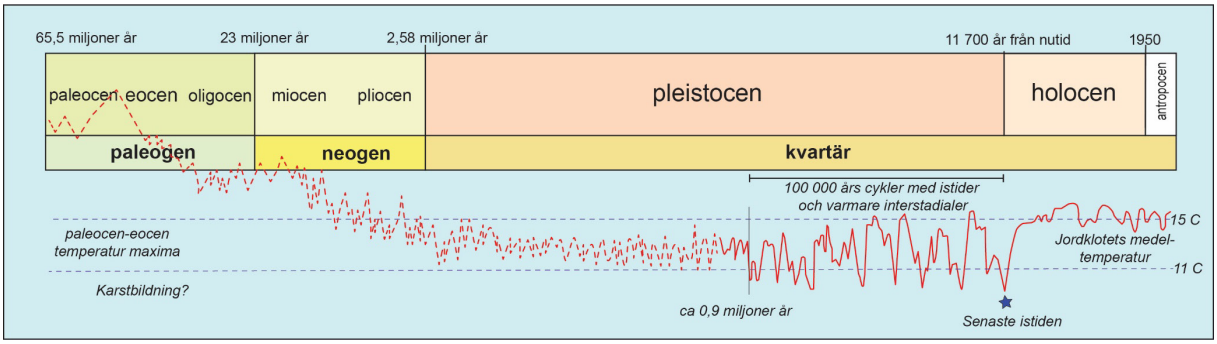


Figur 4. Lummelundasystemet. Kartmaterial modifierat efter underlag från Länsstyrelsen i Gotlands län. Fotot visar droppstensformationer inuti Lummelundagrottan. Foto: Peter Dahlqvist.

efterföljande Littorinatid och landhöjning exponerades successivt mer av Gotlands låglänta områden. Strandlinjekurvor visar att områdena som ligger > 20–25 m ö.h. haft drygt 8 000 år på sig att utveckla karst medan de under denna nivå endast haft cirka 2 000 år.

Det krävs även stabila hydrologiska förhållanden för bildandet av karst. Klimatet var varmare och fuktigare mellan 8 700 och 5 700 år sedan (Borzenkova m.fl. 2015) vilket skulle kunnat driva på utvecklingen av karst, men sannolikt är det för kort tid. För att karst ska utvecklas förutsätts också att grundvattenytan legat stabil och att det funnits en hydraulisk gradient som möjliggör strömning och infiltration av meteoriskt vatten genom en definierad omättad zon. Under holocen tid har denna nivå varierat vilket tillsammans med begränsningar i form av gynnsamt klimat, och tillgänglig tid, indikerar att karst på Gotland påbörjats redan före senaste nedisningen. Det finns också ställvis tecken på att senaste landisen eroderat och jämnat av karsthällmarkerna vilket också styrker teorierna om ett äldre ursprung. Karstvittringen som skett under holocen tid har sannolikt haft längst tid att utvecklas i de landområden som idag ligger > 25 m ö.h. (fig. 1). Dessa områden består i huvudsak av kalksten medan de lägre områdena består mestadels av märgelsten (fig. 1). Att höjdområden består av kalksten och lågt liggande områden av märgel visar på bergarternas relativa skillnad i motståndskraft till den glaciala erosionen.

Ytterligare indikationer på att karstbildningarna är äldre än senaste landisen är karstförekomsterna i fjällkedjan som i jämförelse med södra Sverige haft mycket kortare tid på sig att utvecklas. Här påträffas också karst ofta under mäktiga jordlager. Merparten av denna karst, bland annat utmed Bjurälven, uppvisar tydlig påverkan av glacial erosion vilket kännetecknar så kallad glaciokarst (Veress m.fl. 2019). Glaciokarst definieras som ett befintligt karstlandskap som omformats genom erosion från pleistocen landis. Typiskt för ett sådant landskap är mjukt formade karst-



Figur 5. Schematisk illustration av en geologisk tidskala och global medeltemperatur för de senaste 65 miljoner åren. Temperaturkurvan är baserad på grafik från gergs.net/all_palaeotemps-2.

strukturer som ofta också täcks av jordlager. På Gotland är det osäkert hur stor effekt den glaciala erosionen haft och hur frekvent karst förekommer under jordlagren. Merparten av den karst som uppträder, främst som sprickkarren, på kalkstenshällar visar små tecken på glacial erosion. Möjligtvis kan områden med kraftigt uppbrutna äldre karsthällmarker, så kallade karrenfält (eng. *limestone pavements*)(se definition nedan), skapats av landisen. Som jämförelse kan man använda karstlandskapet i Burren på Irland där ett likartat karstlandskap som på Gotland formats. Här har både pleistocen och holocen karstifiering samt glaciala denudationsprocesser resulterat i stora områden med karrenfält (de la Rosa 2016). Det som är typiskt för karstbildningarna i Burren är de avrundade blockkanterna och mjuka formerna, vilket till viss mån även syns på karsthällmarkerna på Gotland.

Karststrukturer

Det finns ett stort antal publikationer som behandlar klassificering av karst. Denna baserat antingen på genetiska, morfologiska, hydrologiska, klimatologiska eller ingenjörsmässiga grunder (ex. Ford & Williams 2007, Waltham & Fookes 2003, de la Rosa 2012). Antalet begrepp och termer för karst som omnämns i litteraturen är följaktligen stort.

De beskrivningar som finns härrör också från områden med komplexare och mer omfattande karst än vad som påträffas i Sverige. I många länder med tempererat och tropiskt klimat är det ofta storskaliga och extrema karstlandskap med grottsystem, doliner och restberg. Karstlandskapet i de Dinariska alperna på västra Balkan är ett av Europas bästa exempel på omfattande och storskalig karst. Andra exempel med storskalig karst är Yucatanhalvön i Mellanamerika och Halong Bay i Vietnam.

Merparten av de karststrukturer som vi kan observera i Sverige är ytnära karst (epikarst) som i vissa fall utvecklats på djupet till komplexa grottsystem, som till exempel Lummelundagrottan (fig. 4).

Epikarst är strukturer som bildas i den omättade zonen med meteoriskt vatten, det vill säga nederbördsberoende karst. Det är också i den omättade zonen som merparten av upplösningen sker eftersom det meteoriska vattnet ofta hinner nå jämvikt mellan koldioxiden i vattnet (kolsyra) och dess salt (bikarbonat) innan det når den mättade zonen (grundvattnet). I tabell 1 och figur 6 ges en översikt av klassificeringen av olika epikarststrukturer som vi finner på Gotland.

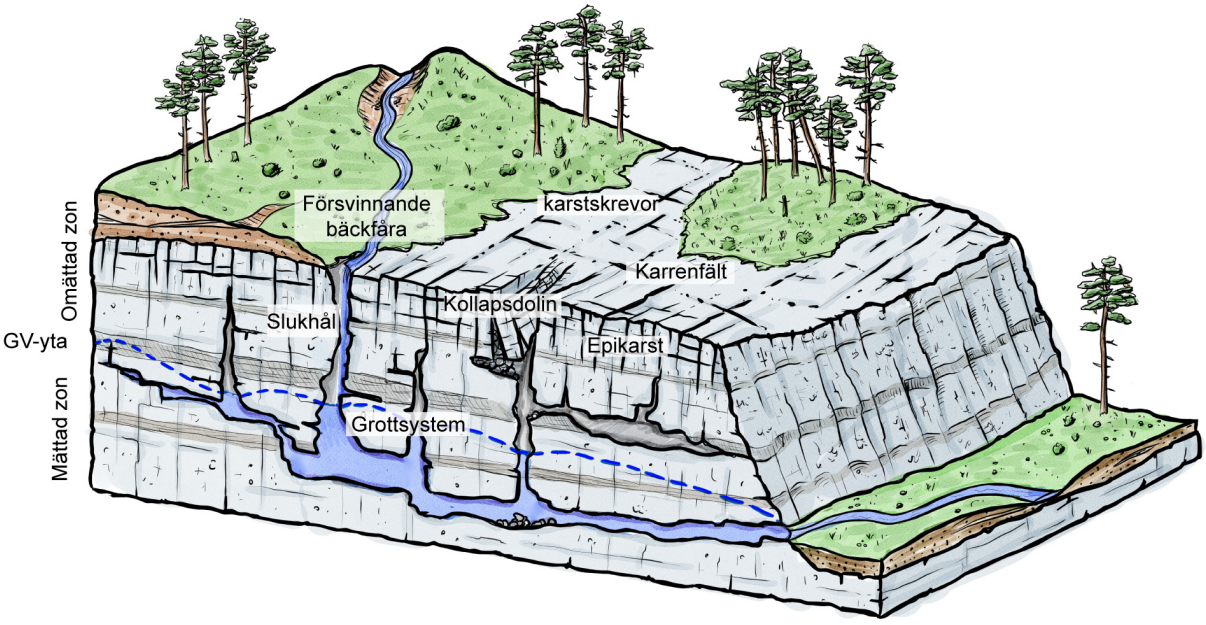
Karren av olika slag är den vanligaste epikarsten på Gotland. De minsta är så kallade rännilar (eng. *rillen runnels* och *rinnen*) som består av grunda meandrande kanaler (spår) som härrör från upplösning från ytvattenavrinning på sluttande kalkstenshällar (fig. 7a). *Kamenitzas* är enskilda grunda gropar i hällytan som bildas av periodiskt stillastående vatten i små sänkor på oregelbundna hällytor. Vanligtvis är de på Gotland 10–50 cm stora och < 10 cm djupa. Karstskrevor (eng. *grykes*) är den mest tydliga epikarsten på Gotland (fig. 7b–c). De har bildats genom upplösning och vidgning av befintliga sprickor. De uppemot 50 cm breda kilformiga skrevorna i

markytan smalnar av mot djupet. Djupgåendet varierar från några decimeter till flera meter. I vissa områden på Gotland är skrevorna uthålliga och kan följas flera hundra meter även om det är mer vanligt att de är < 10 m långa. Skrevorna är också i varierande grad fyllda med löv, barr och humus, det vill säga organiskt material som bidrar med biogen koldioxid till det meteoriska vattnet. När det finns ett stort antal korsande karstskrevor kan berggrundsytan bli sönderbruten i mindre block och bildar då så kallade karrenfält (eng. *limestone pavement*) (fig. 7d). Skrevorna på Gotland är ofta avbrutet undulerande och orienterade mer eller mindre parallellt eller i ett korsande ortogonalt eller polygonalt system (fig. 8).

Vi har observerat att karstskrevornas djupgående beror på kalkstenens lagring och bankning. Ofta bryts eller länkar sprickorna av vid lagergränser redan på 0,5–1 m djup vilket gör att det meteoriska vattnet omväxlande följer sprickor respektive utmed hydrauliskt konduktiva lagringsplan på sin väg neråt i berggrunden. Denna oregelbundna sick-sack-formade karst kan under gynnsamma förutsättningar vidgas och bilda grottor, doliner och slukhål (ex. fig. 9a–c). Exempel på hur sprick-skrevor länkar av på djupet kan ses i en gammal brottvägg nordväst om Alskog på mellersta Gotland i anslutning till det drönarkartlagda området Tjärdal (fig. 9b).

Doliner har beskrivits på flera platser mellan Lummelunda och Martebo. Engh (1980) anger fynd av 53 doliner varav merparten är lösningsdoliner. Dessa karaktäriseras av skålformiga sänkor som bildats under jordtäcket genom upplösning av lokalt uppsprucken eller svagare kalksten. Några få doliner har av Engh (1980) klassats som alluvialdoliner där klappersten sjunkit ner i en kollapsad dolin. Dolinerna på Gotland är svåra att urskilja från andra landskapsformer i terrängen och vi har inte kunnat påvisa några, förutom möjligtvis ett dolinområde vid Muskmyr på Sudret (fig. 7e). Här finns också en blind bäckfåra som slutar i ett slukhål.

Slukhål är kända från flera platser på Gotland. Främst är det kring Visby och inom Lummelundagrottans karstområde som slukhål dokumenterats (fig. 9d). Slukhålen dränerar ytvatten till djupare nivåer i berggrunden och är ofta kopplade till system med underjordiska karstkanaler.



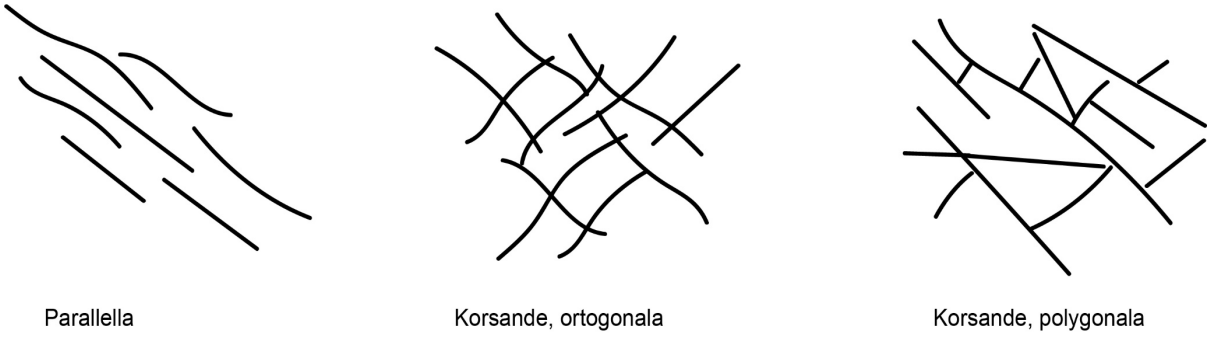
Figur 6. Schematisk illustration av karststrukturer som vi kan se på Gotland. Illustration: Daniel Sopher.

Tabell 1. Sammanställning av nomenklatur, karaktär och bakomliggande process för epikarst.

Nomenklatur		Karaktär	Process
Karren	Mikrorännilar (eng. *rillen*)	Grunda oregelbundna ytliga spår (1–5 cm breda och djupa)	Bildade genom ytavrinning utan koppling till sprickor
Karren	Rännilar (eng. *runnels*)	Djupa rundade fåror > 5 cm på hällar	Bildade genom ytavrinning utan koppling till sprickor ofta i brantare sluttningar med strömmande ytvatten
Karren	Kanaler (eng. *rinnen*)	Djupa rundade kanaler med skarpa kanter	Bildade genom ytavrinning utan koppling till sprickor ofta i brantare sluttningar med strömmande ytvatten
Karren	Kamenitzas	Enskilda runda till avlånga grunda gropar i hällytor	Bildade genom ytvittring i stillastående vatten
Karren	Karstskreva (eng. *gryke*)	Kilformad djupvittrad och vidgad spricka	Bildad av nedsipprande meteoriskt vatten i den omättade zonen
Karren	Karrenhål	Enskilda djupa gropar, hålor, ofta i anslutning till korsande sprickor i berggrunden	Nedsipprande meteoriskt vatten i den omättade zonen
Karrenfält (eng. *limestone pavements)*		Sönderbruten kalkstensyta med multipla karrenstrukturer	Bildade av meteoriskt vatten i den omättade zonen och ofta genom glacial erosion
Doliner	Upplösningsdolin	Framvittrad sänka i berggrundsytan, ofta på grund av lokalt uppsprucken berggrund	Bildade av meteoriskt strömmande vatten utmed svaghetszoner i den omättade zonen
Doliner	Kollapsdolin	Skapad genom att karstgrotta (hålrum) kollapsat, ofta med lösa block i botten på sänkan. I hällmarker med tunna jordlager/vittringsjord	Bildade av meteoriskt strömmande vatten utmed svaghetszoner i den omättade zonen
Doliner	Begravd dolin	Sänka med mjuka konturer fylld med jordlager	Bildade av meteoriskt strömmande vatten utmed svaghetszoner i den omättade zonen, kan ha ett ursprung som upplöst eller kollapsad dolin
Slukhål	Öppet slukhål	Brantstående vittrade gångar ovanför den mättade zonen, framträder som en sänka med ris, löv m.m. kring öppningen	Bildad genom upplösning från nersipprande meteoriskt vatten i sprickor eller svaghetszoner i den omättade zonen
Slukhål	Slukhålssänka	Sänka som skapats genom att finkorniga jordlager sjunkit ner i det underliggande slukhålet	Bildad genom upplösning från nersipprande meteoriskt vatten i sprickor eller svaghetszoner i den omättade zonen, ofta inte längre aktiva slukhål för ytvattenflöden
Slukhål	Begravt slukhål	Sänka med finkorniga sediment som avsatts under perioder med strömmande ytvatten som dräneras ner i det underliggande slukhålet	Bildad genom upplösning från nersipprande meteoriskt vatten i sprickor eller svaghetszoner i den omättade zonen, ofta inte längre aktiva slukhål för ytvattenflöden och ytvattenströmning
Försvinnande vattendrag	Blind bäckfåra	Mindre vattendrag som slutar blint utan synligt ytligt utflöde, ansluter till slukhål	
Karstkälla	Källflöde från karst	Källflöde/källhorisont (utströmning) i anslutning till karststrukturer	Vattenströmning och kanalerosion i den vattenmättade zonen

Figur 7. Exempel på ytnära karst på Gotland. **a)** Karstvittrade rännilar på en hällyta vid Tjärdal (6361416/716064) **b)** Gropvittring så kallad kamenitzas i Mallgård (6364195/716296) **c)** Karsthällmark med karstskrevor i Mallgård **d)** Karrenfält i Sigsarve (6362524/716940) **e)** Dolinlandskap vid Muskmyr (6315809/694579) **f)** Slukhål i Mallgårdsområdet.
Foton: Mikael Erlström.

Enskilda slukhål i Lummelundaområdet (fig. 9d) har uppmätts kunna dränera flera hundra liter per sekund (Engh 1980). Slukhålen kan vara mer eller mindre dolda under vattenfyllda sänkor i landskapet eller dolda av ris eller grenar som ansamlats i öppningen. Vattenföringen ner i slukhålet kan också variera kraftigt beroende på hur mycket löst material som finns i det. Slukhålen är oftast mindre än en halv meter i diameter (ex. fig. 9f) men kan också ha avlånga öppningar som visar att de kan ha ett ursprung från utvidgade karrenhål eller djupa karstskrevor. I vissa fall kan växtligheten också vara något frodigare kring slukhål.



Figur 8. Schematisk skiss som illustrerar klassificeringen för olika system med karstskrevor.

Andra definitioner

Det finns som nämnts en omfattande terminologi för karst men några begrepp som förutom epikarst ofta förekommer är exokarst, endokarst, pseudokarst, och paleokarst. Exokarst är ett begrepp som används som samlingsnamn på alla typer av karstrelaterade ytformer och strukturer som finns i markytan. Det innefattar allt från de minsta karrenstrukturerna på berghällar till stora doliner. Endokarst är ett begrepp för all karst som förekommer under mark. Epikarst är den översta kraftigt vittrade delen med karrenstrukturer där vatten uppehåller sig innan det sipprar ner till underliggande akviferer.

Pseudokarst är ett begrepp för karstlikande landskap som bildats i icke upplösningsbar berggrund. Tell (1973) redovisar landskapsvis att förekomsten av pseudokarst i det svenska urberget består mestadels av skrevor och grottor som utformats genom mekanisk vittring.

Strukturer som bildats genom kemisk upplösning från alger och lavar benämns för biokarst eller phytokarst.

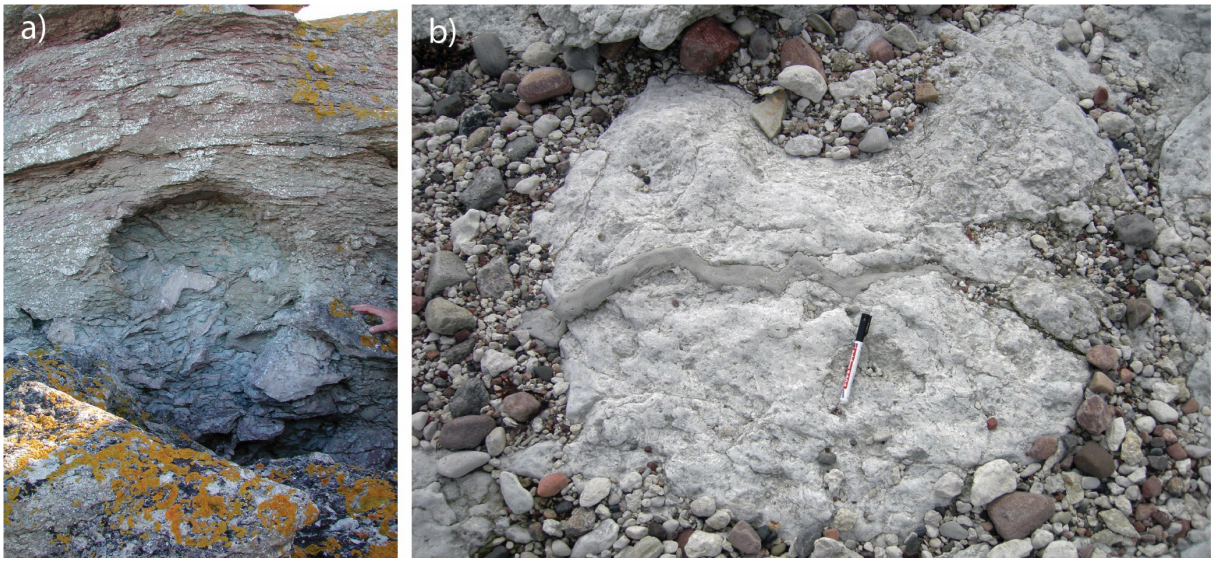
Paleokarst definierar äldre karst som begravts av yngre berggrund. På Gotland finns ett antal exempel på karst som bildades under silurisk tid (fig. 10, Cherns 1982, Frykman 1985, Calner 2002, Ericsson 2004).

Karst och hydrogeologi

Karstpåverkad berggrund har stor betydelse för grundvattenbildningen, förekomsten av grundvattenmagasin och för de hydrologiska förhållandena i markytan. I många länder som i till exempel Slovenien, Serbien, södra USA och Kina är grundvattenmagasin i karst viktiga grundvattenresurser. Uppskattningsvis förses 20–25 % av världens befolkning med dricksvatten från karstbaserade grundvattenmagasin (Ford & Williams 2007). På Gotland baserades förr i tiden stora delar av Visbys vattenförsörjning på källor vars vatten ofta kom ifrån ett karstpåverkat tillrinningsområde (Bergström 1987). Vidare bidrar karstlandskap med ett flertal ekosystem kopplade till de speciella hydrogeologiska miljöerna som finns (Goldscheider 2012).

Normalt är den hydrauliska konduktiviteten (K) för kalksten mycket låg. Beräkningar baserat på kapacitetstester av bergborrade brunnar ger K i storleksordningen 10^{-6}–10^{-7} m/s för kalkstensområdena på Gotland (Hjerne m.fl. 2021). Dessa värden kan ses som K för formationen som helhet eftersom merparten av vattentransporten sker i sprickor i kalkstenen. Om man bestämmer K för sprickfria kärnprov är det avsevärt lägre. Om den hydrauliska konduktiviteten i stort sett är den samma var man än befinner sig i en formation, talar man om homogena hydrauliska

Figur 9. Exempel på **a)** förlängning av karstskreva på djupet vid Tjärdal (6361451/716133), **b)** epikarst i brottvägg i Tjärdal, **c)** detalj av epikarst i brottvägg vid Tjärdal och **d)** slukhål i dike från Martebomyr till Lummelunda (6404708/703878). Foton: Mikael Erlström (9a–c) och Magdalena Thorsbrink (9d).



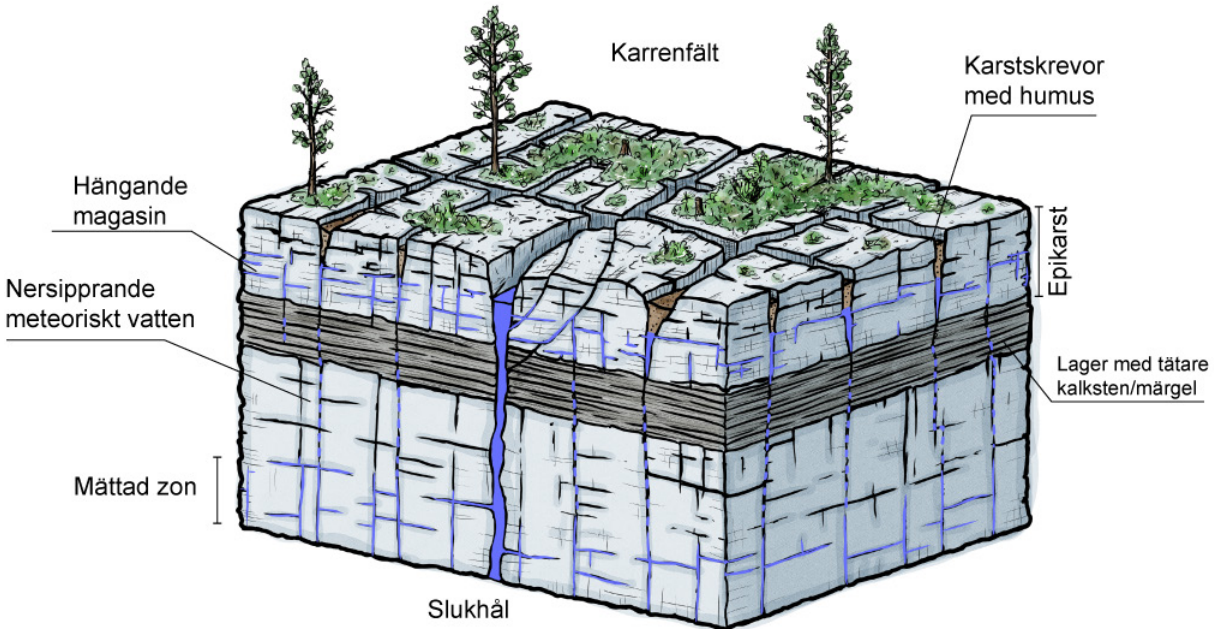
Figur 10. Paleokarst. **a)** Raukstruktur skapad under silurisk tid vid Grogarn (6372833/733829). **b)** Karstskreva i Ekekalksten fylld med Burgsviksandsten (grå slingrande fyllnad) vid Närsholmen) (6347300/1674100). Foto: Mikael Erlström.

förhållanden. Om K dessutom är samma i alla riktningar talar man om att det råder isotropa förhållanden. I en karstpåverkad berggrund varierar dock K oftast kraftigt i olika riktningar och lägen. Det betyder att det råder heterogena och anisotropa hydrogeologiska förhållanden, vilka är svåra att bedöma.

Den del av nederbörden som bildar grundvatten har perkolerat genom den omättade zonen med hjälp av gravitation tills det nått grundvattnet. Normalt perkolerar vattnet i stort sett vertikalt genom en porakviferer men när det gäller karst rör sig vattnet neråt via enskilda ledningsvägar, sprickor och karstvidgade sprickor, slukhål och underjordiska gångar genom relativt tät omgivande kalkstensberggrund. Det kan betyda hastigare och varierande flöden som svarar upp relativt snabbt mot en ökad nederbörd. Omfattningen av epikarst spelar här en avgörande roll för dränering och infiltration av det meteoriska vattnet till grundvattnet. Djup, bredd och relativ andel epikarst styr hur stor mängd vatten de maximalt kan hålla. Andelen av det vatten som ansamlats i epikarsten, och som infiltrerar på djupet, beror på den hydrauliska kontakten i den underliggande omättade zonen och hur epikarsten ansluter till underjordiska karstvittrade strömningsvägar eller andra hydrauliska ledare som till exempel lagringsplan, styloliter (struktur som bildas genom tryckupplösning) och sprickor (fig. 11). Under gynnsamma förhållanden kan underjordisk karst leda till att kilometerlånga grottsystem utvecklas där vattnet till slut via underjordiska kanaler mynnar i källor och grottmynningar. Exempel på detta är det flera kilometerlånga grottsystemet i Lummelunda (ex. fig. 4, 6).

I vissa fall kan nederbörden snabbt perkolera på djupet via epikarsten, men i andra fall är det en långsam process, bland annat beroende på att det i botten på karstskrevorna finns finmaterial med lägre permeabilitet som fördröjer infiltrationen neråt. Hur som helst bör förekomsten av epikarst främja grundvattenbildningen till berggrunden. I vissa fall kan den även skapa dräneringsvägar för snabb avrinning, som till exempel när lateralt uthålliga karstskrevor uppträder i sluttande terräng och när de inte har en koppling till djupare liggande sprickor. Merparten av karstskrevorna på Gotland påträffas i relativt flack terräng vilket gör att de bedöms ha större betydelse för infiltrationen än för ytavrinningen.

Den lösta koldioxiden i det meteoriska vattnet förbrukas relativt snabbt med djupet vilket gör att epikarst vanligtvis inte sträcker sig djupare än cirka 15 m (Williams 2008, Jones 2013). I inte fullt utvecklade karstmiljöer som den på Gotland, där man även kan förmoda att en del av epikarsten



Figur 11. Schematisk illustration av hydrogeologiska förhållanden kopplade till karsthällmarker med epikarst (karstskrevor, slukhål och karrenfält) på Gotland. Illustration: Daniel Sopher.

skalats bort av glacial erosion, bedöms epikarsten inte vara mer än ett par meter djup. I vissa fall kan epikarsten bilda så kallade hängande lokala magasin (fig. 11). Dessa fylls på snabbt vid nederbörd och dräneras genom att vatten långsamt perkolerar ner till det underliggande grundvattenmagasinet i berg via sprickor. Man kan säga att epikarsten bidrar till bildandet av tillfälliga ytliga vattenmagasin i den vanligtvis omättade zonen.

På Gotland är karstsrevorna ofta mindre än en meter djupa och det vatten som ansamlas i skrevorna perkolerar inte bara neråt utan länkas ofta av utmed lagringplan mot underliggande lager med mindre karstbenägen kalksten eller märgelsten. Detta laterala flöde kan resultera i utsipprande meteoriskt vatten i intilliggande lägre terräng vilket i sin tur kan ge förutsättningar för bildning av temporära våtmarker. Exempelvis har detta observerats i pilotområdet vid Ala. Flera källor på Gotland har troligen en koppling till antingen relativt ytlig avrinning från karstområden vid en lågkonduktiv zon, eller via något djupare och större karstgångar. Ett exempel är Kutkäldu, strax norr om Tingstäde Träsk vars vatten kommer från slukhål i Fjurbärsån. Knutet till källor finns ofta en karaktäristiskt och speciell natur som karaktäriseras som ett grundvattenberoende ekosystem (Thorsbrink m.fl. 2016).

För att kunna bedöma epikarstens betydelse för de hydrogeologiska förhållandena både gällande kvarhållande av vatten i landskapet samt för grundvattenbildningen till berg är det avgörande att förstå hur djupt speciellt karstskrevorna når och hur infiltrationsvägarna ser ut för det meteoriska vattnet. Den hydrauliska gradienten i området kan ha en påverkan på men även ha påverkats av karstbildning och kan således vara av vikt att ta reda på.

METODIK

Beskrivning av pilotområdena

De fyra pilotområdena i denna studie är lokaliserade till östra delarna av mellersta Gotland (fig. 12). Samtliga undersöktes med drönare och i två av områdena utfördes kontinuerliga mätningar av vattennivåer i karstskrevor med hjälp av nivåloggrar. Områdena med nivåloggrar benämns *Bjärges* som ligger mellan byarna Ala och Ardre och *Sigsarve* som ligger norr om väg 144 och byn Alskog (fig. 13a–b). Områdena som endast undersöktes med drönare benämns *Tjärdal* respektive *Mallgård* (fig. 13c–d). Vid Ardre kyrka placerades en nederbördsstation för att få nederbördsdata som komplement till data från SMHI:s mätstation i Vänge (fig. 12e).

Mallgård

Pilotområdet Mallgård ligger cirka 1,5 km norr om området Sigsarve i sydvästra hörnet av Natura 2000-området Mallgårds Haid (fig. 13a). Området karaktäriseras av öppen hällmark med gles vegetationen bestående av låga örter, enbuskar och lågvuxen tallskog. Området är flackt med liten topografisk variation och frekvensen av karst relativt jämnt fördelad. Många sprickor har stor lateral utbredning och framträder ofta som tydliga växtlinjer. Som helhet finns de topografiskt högre områdena i nordväst (cirka 47 m ö.h.) och de lägre i sydost (cirka 44 m ö.h.).

Bjärges

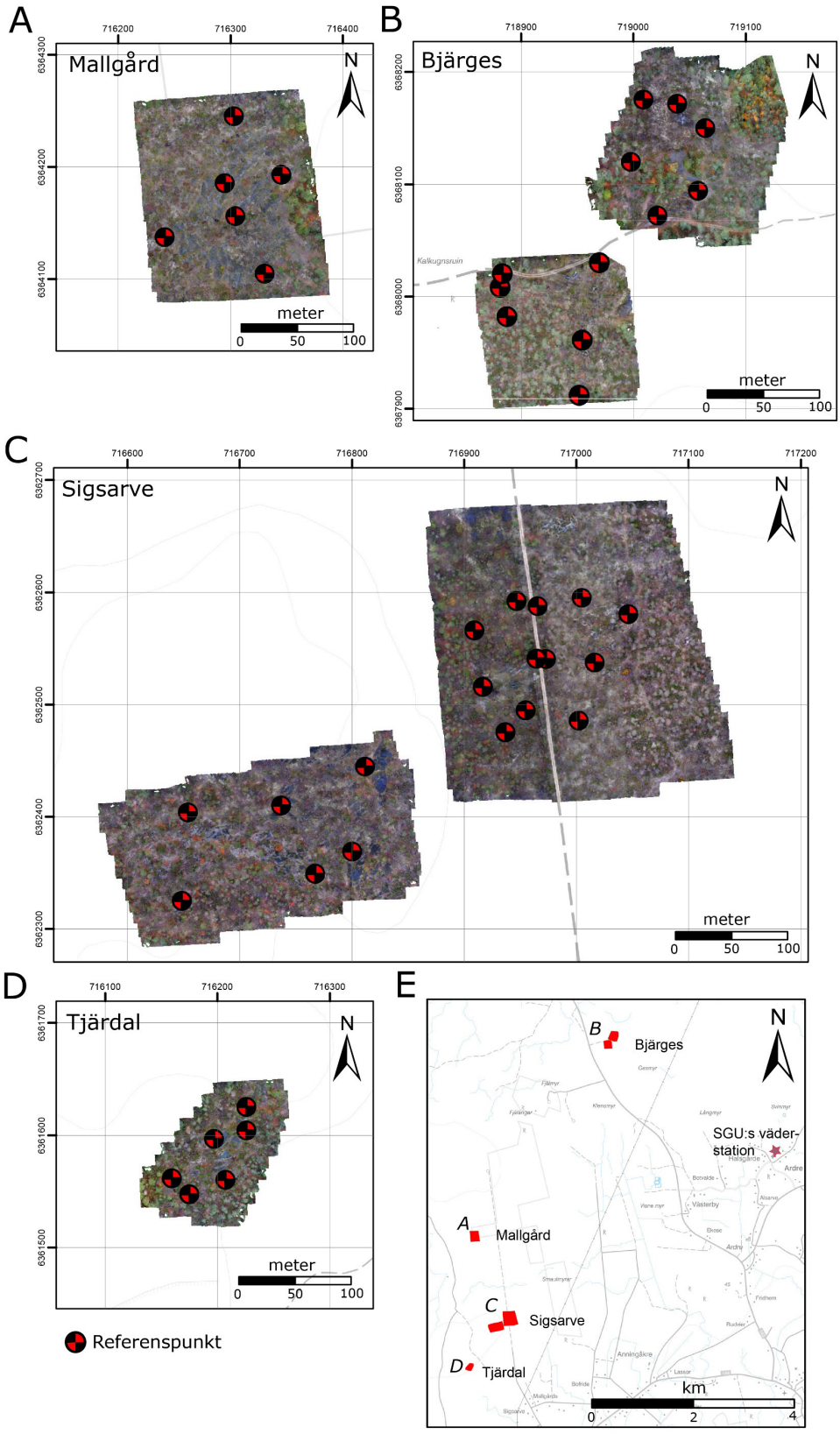
Det relativt flacka området som ligger några hundra meter öster om väg 143 är ett relativt öppet markområde med väl synliga jämnt fördelade karstsprickor (fig. 13b). Vegetationen består till största delen av enbuskar, lågvuxen tall, gräs och vitmossa. Periodvis och kopplat till karstsprickor finns orkidéer och ormbunkar. Topografiskt finns de högre liggande områdena i söder (cirka 44 m ö.h.) och de lägre i nordnordost (cirka 38 m ö.h.). Flera av sprickorna har en stor lateral utbredning och framträder även som tydliga växtlinjer. I området finns också ett låglänt område beväxt med ag där det står vatten under vissa delar av året.

Sigsarve

Området ligger cirka tre kilometer norr om väg 144 och består av öppen hällmark och karsthällmark med stor frekvens karstskrevor. Topografiskt är området något högre i väster (cirka 55 m ö.h.) och lägre i ostnordost (cirka 45 m ö.h.). Vegetationen består till största delen av gles och lågvuxen tallskog med inslag av enbuskar och mossa. Periodvis och kopplat till karstsprickor finns även orkidéer och ormbunkar (fig. 13c). De högre liggande partierna och övre kalkstenslagret är mer påverkat av karst och överytan är ofta uppbruten av korsande karstskrevor som resulterar i karrenfält. I vissa delar av området verkar det som att en viss blockplockning skett av det översta lagret, så området är inte orört. Djupare lager har en lägre sprickfrekvens men förekommande sprickor är längre.

Tjärdal

Området som ligger cirka en kilometer sydväst om Sigsarve är det minsta pilotområdet i vår studie. Till skillnad från övriga avgränsas det i söder av en 2–3 m hög brottvägg i ett äldre mindre kalkstensbrott (fig. 13d). Det gör det möjligt att här även studera karstskrevornas utbredning på djupet (se fig. 9a–c). Vegetationen karaktäriseras av gles och lågvuxen tallskog med inslag av enbuskar och örter. De högst liggande partierna har en högre sprickfrekvens och mer påverkad av karst. Troligen har en viss plockning av lösa kalkstensblock skett av det översta lagret. Topografiskt är området svagt undulerande men generellt högre i norr (cirka 55 m ö.h.) och lägre i söder (cirka 51 m ö.h.).



Figur 12. Illustration som visar en översikt av de drönardokumenterade pilotområdena och de skapade ortofotona med placeringen av de inmätta referenspunkterna.

Figur 13. Foton från pilotområdena **a)** Mallgård, **b)** Bjärges, **c)** Sigsarve och **d)** Tjärdal.
Foto: Mikael Erlström (13b–c) och Peter Dahlqvist (13a, d).

Dokumentation av karst med drönare

Som en del av projektet genomfördes 2019 ett test att kartlägga karst med hjälp av drönare (fig. 14). Totalt togs 3 691 drönarfotografier över de fyra pilotområdena (fig. 12) med en sammanlagd area på cirka 18 hektar. Fotograferingen gjordes med en Mavic 2 Pro-drönare med en nominell flyghöjd på 20 eller 25 m. Som stöd för överföring av fotografierna till ortofotokartor användes inmätta och utlagda kontrollpunkter (synlighetsmarkörer i drönarfotografierna, fig. 12) med ett Topcon GNSS-system. Mellan sex och tolv kontrollpunkter mättes ut för respektive område.

Drönarfotona slogs samman till ortofotokartor med hjälp av mjukvaran Agisoft. Genomsnittlig noggrannhet i positioneringen av fotona bedöms vara en halv meter i närheten till kontrollpunkterna och en meter i ytterområdena. Vid bearbetning skapades höjdkartor (DEM) som tillsammans med ortofotokartorna användes för att tolka förekomsten och utbredningen av karst. Ett exempel av ortofotokarta, höjdkarta och tolkning visas i figur 15a–c.

På bar häll eller i områden med tunt jordtäcke framträder karsten tydligt i ortofotona och på höjdkartorna (fig. 15a–b). Karstskrevor som är den vanligaste och tydligaste strukturen framträder som mörka stråk i fotona och förekommer ofta i polygonala eller konjugerande system. Intressant är att berghällen närmast skrevan ofta är ljusare än längre bort. Detta är sannolikt kopplat till förekomst av hällsnäckor som lever i skrevorna och som betar av skorplavarna närmast kanten. Snäckorna är också en indikatorart för karsthällmarker (Jordbruksverket 2003). I vissa områden visar drönarfotona även tydliga uppspruckna karrenfält (eng. *limestone pavement*). Även sprickkarren med vegetation av gräs, mossor och buskar framträder tydligt. Karrenhål förekommer ofta längs linjer i terrängen. Även mycket små karststrukturer som mikrorännilar kan identifieras. I figur 16a–f visas ett antal exempel på drönarfoton av olika karststrukturer.

Figur 14. Drönardokumentation av pilotområdet Mallgård (6364170/716272). Foto: Mikael Erlström.

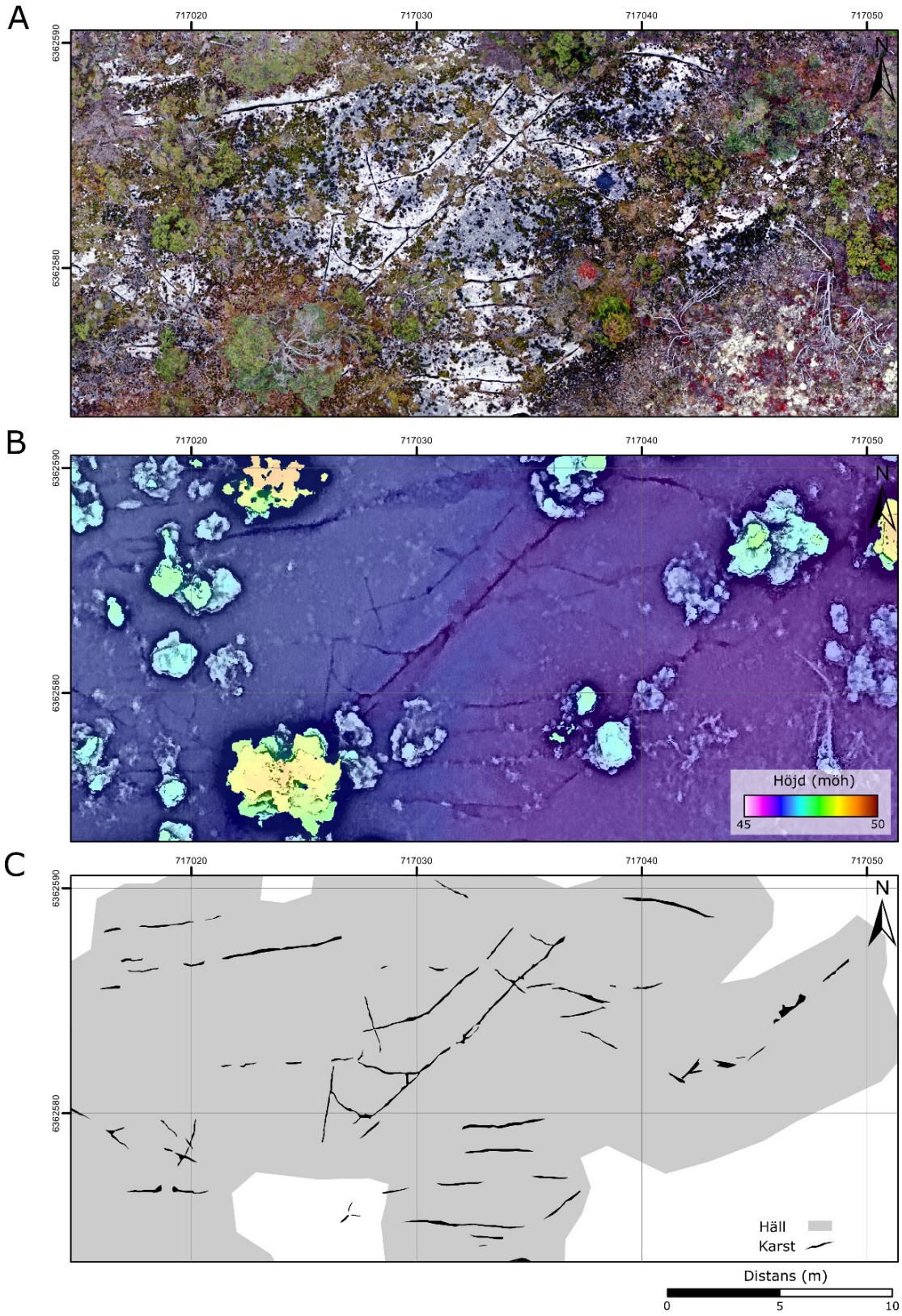
Tolkning av frekvensen, orienteringen, bredden och längden av karsten gjordes genom att ortofoton och höjdkartor importerades i ArcMap. Tolkningen genomfördes enligt följande schema:

1. Polygoner skapades manuellt för karstskrevor och karrenhål. Karrenskrevorna framträder som mörka avlånga partier i fotona. Även karstskrevor och karrenhål fyllda med jord eller vegetation togs med där man kunde definiera avgränsningen. Arbetet resulterade i polygoner som använts för statistiska beräkningar av karstens riktning, bredd och area. Ett exempel på tolkade polygoner visas i figur 15c.

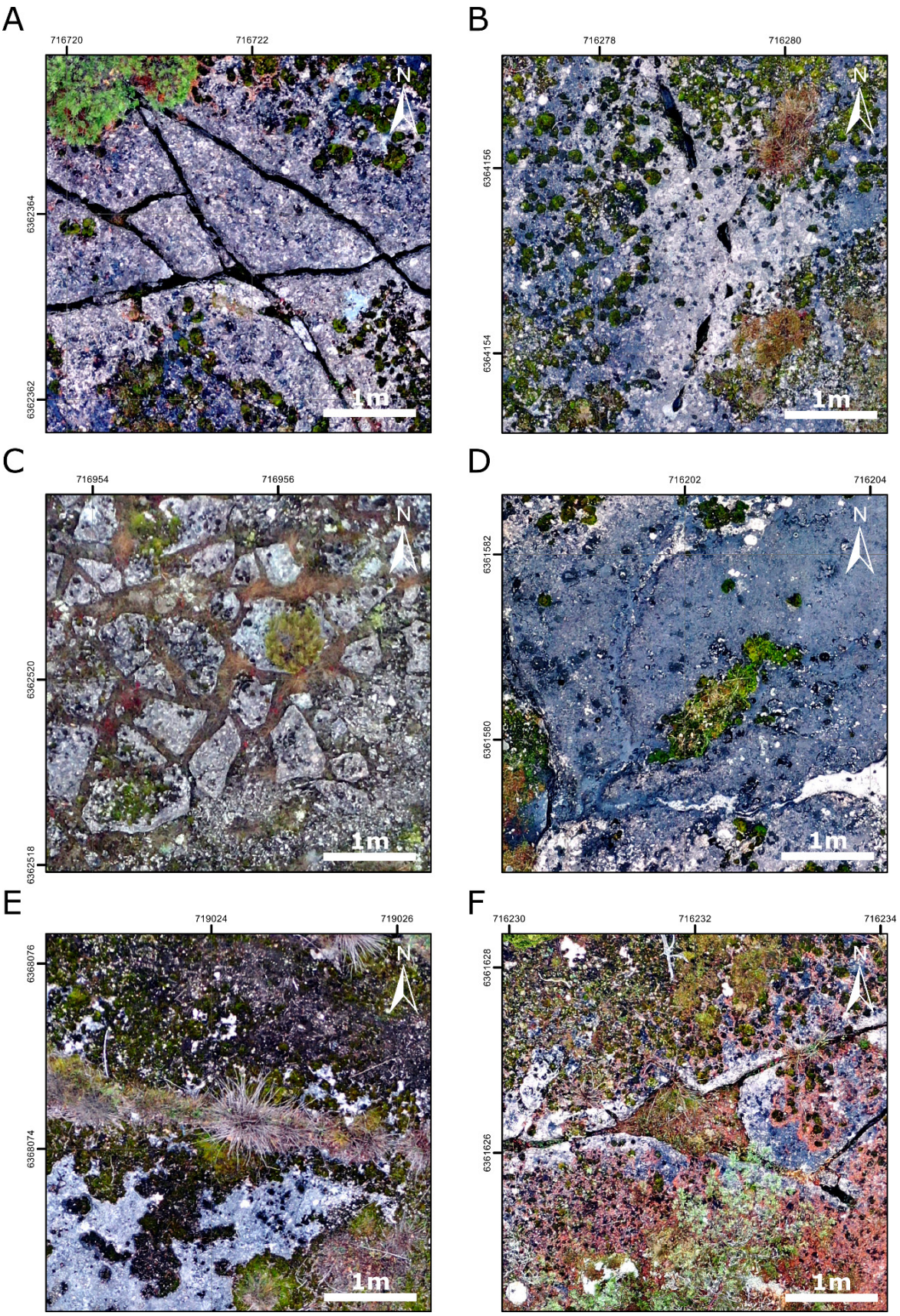
2. Växtlinjer som bedöms kopplade till mindre omfattande karst eller öppna sprickor (fig. 3e) tolkades som *polyline-shapefiler*, som placerades centralt längs växtzonen. Objekten har använts för statistisk värdering av riktningen av eventuella sprickor eller karstskrevor som är kopplade till växtlinjer. Däremot ger tolkningen ingen information om sprickornas bredd.

3. För samtliga pilotområden gjordes även en tolkning av utbredningen av bar hällmark. Polygoner skapades för områden där häll var synlig i fotona. Den sammanlagda arealen för dessa användes för beräkning av andelen karst inom hällområdena.

Totalt resulterade tolkningen i mer än 3 000 polygoner av karstskrevor och karrenhål samt 400 polylinjer av tolkade växtlinjer. Dessa objekts data importerades till mjukvaran Matlab för en statistisk analys av riktning, bredd, längd och andelen karst. Riktningen samanställdes som sprick-rosor där objekten för karstskrevor, karrenhål och växtlinjer användes. Bredden på karstskrevorna och karrenhålen mättes med regelbundna intervall vinkelrätt längs polygonriktningen. Resultaten sammanställdes i histogram för de olika områdena. Längden på polygoner och polylinjer sammanställdes linjärt och logaritmiskt i histogram. Karsttätheten eller andelen karst beräknades genom att pilotområdena delades in ett rutnät med 10x10 m stora rutor. Inom varje ruta beräknades ytan för karst och ytan för hällmark. Vid beräkning av karsttätheten användes de rutor där > 20 % av ytan bestod av bar häll.



Figur 15. a) Exempel på drönarfoto från området vid Sigsarve med förekomst av karstskrevor och karrenhål. **b)** Motsvarande områden illustrerad som höjdmodell. **c)** Exempel på tolkade karstobjekt och häll för samma område.



Figur 16. Exempel på olika karststrukturer som dokumenterats. **a)** Karstskreva. **b)** Karrenhål. **c)** Karrenfält *"limestone pavement"*. **d)** Mikrorännilar på hällytor. **e)** Växtlinje, tolkad att indikera närvaron av en karstskreva. **f)** Exempel på vidgad karstskreva där olika karstskrevor möts.

Nederbördsdata – nivåmätningar med loggrar

För att studera nederbördsmönster och förändringar i trycknivå i karstsprickor inom pilotområdena Bjärges och Sigsarve placerades en väderstation vid Ardre kyrka (se fig. 12e) samt totalt 11 nivåloggrar (tryckmätare för vatten med intern lagring) och en barologger (tryckmätare för luft med intern lagring) i respektive område (fig. 17, tabell 2). Barologgrar (L109-Baro och L121-Baro) användes för att kompensera för barometertrycket i respektive område mot uppmätta absoluttryck i övriga nivåloggrar.

Uppsättning av loggrar utfördes enligt figur 18. Nivåloggrar fästes med ett snöre i en planka som lades över karstsprickan. Genom plankan borrades ett hål för att kunna trä igenom ett kvastskaft som fördes ner i jordlagren i karstsprickan som en fast punkt. Innan plankan och kvastskaftet sattes på plats satte vi ner en enklare form av grundvattenrör i jordlagren i karstsprickan. Röret består av ett vanligt pvc-rör med flera borrade hål (under nivån för jordlagren) och med en öppen botten. Inmätning skedde av marknivå, bottennivå i karstsprickan samt nivån för tryckmembranet i respektive nivålogger.

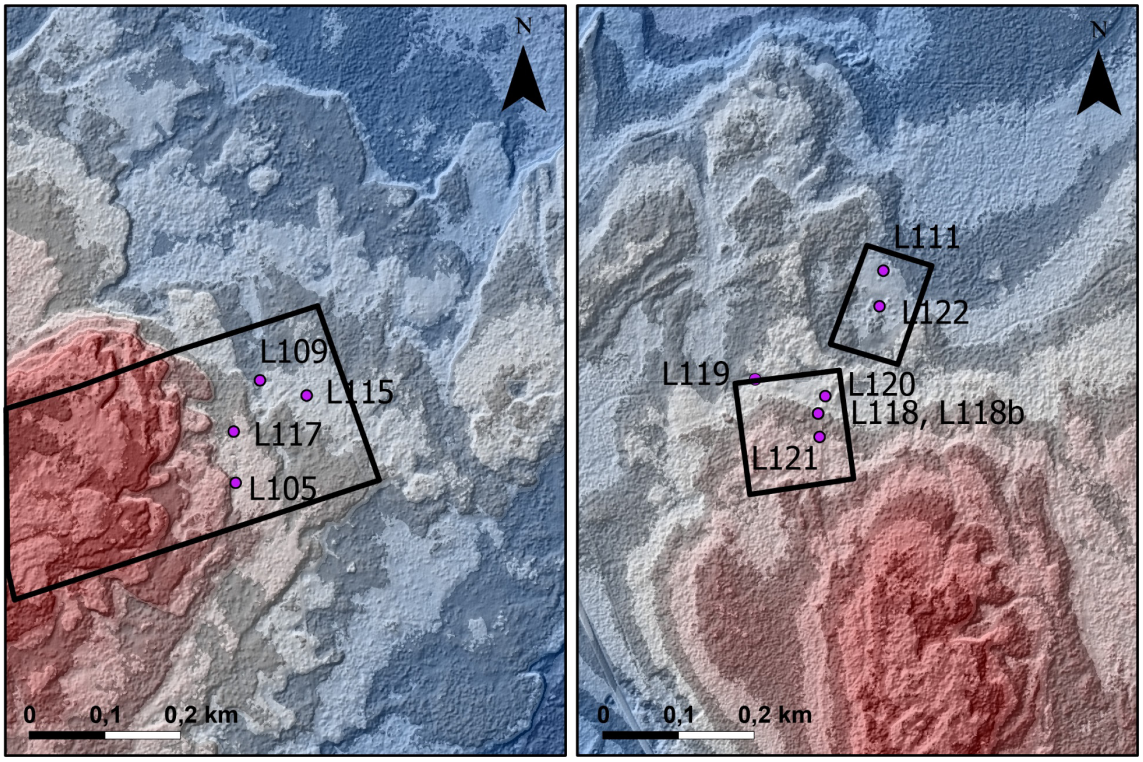
Nivåloggrar registrerade enligt så kallad *event loggning*, det vill säga de mätte kontinuerligt men lagrade bara data när det skedde tryckförändring jämfört med om föregående lagrade data var större än 1 cm. Tryckdata har sedan räknats om till meter över havet för presentation i denna rapport. Nerladdning av data från nivåloggrar gjordes manuellt vid några fältbesök under, samt vid slutet av mätperioden.

Nederbördsuppgifter hämtades från vår väderstation vid Ardre kyrka som ligger cirka fyra kilometer sydost om Bjärges och sex kilometer ostnordost om pilotområdet Sigsarve. Kompletterande nederbördsdata hämtades från SMHI-stationen Vänge 10 km västnordväst om Bjärges och 11 km nordväst om Sigsarve.

I Bjärgesområdet placerades en barologger samt sju nivåloggrar ut i sex karstsprickor (fig. 17). I en av karstsprickorna sattes två nivåloggrar (L118 och L118b), en inuti ett grundvattenrör och en utanpå röret (fig. 18a). Tanken var att jämföra resultaten från dessa två tryckgivare och se om placeringen påverkade resultatet. Även L121 sattes på ett kvastskaft medan övriga nivåloggrar sattes inuti grundvattenrör (fig. 18a). I Sigsarveområdet placerades en barologger samt fyra nivåloggrar ut i fyra karstsprickor. Samtliga sattes inuti ett grundvattenrör (fig. 18a).

Tabell 2. Information om de dataloggrar som ingick i undersökningen i respektive område. Koordinater i Sweref99TM.

Loggernamn	Installation	X	Y	Z (sensor)	Logger-ID	Område
L111	rör	638163,9	719044,2	38,75	SN2082887	Bjärges
L122	rör	6368116,9	719039,1	39,39	SN2083530	Bjärges
L119	rör	6368020,5	718874,7	39,67	SN2083275	Bjärges
L120	rör	6367998,4	718967,4	40,54	SN2083317	Bjärges
L118	rör	6367975,4	718957,9	41,20	SN2083315	Bjärges
L118b	kvastskaft	6367975,4	718957,9	41,25	SN2083260	Bjärges
L121	kvastskaft	6367944,5	718959,9	41,95	SN2083246	Bjärges
L109	rör	6362597,4	716941,8	45,41	SN2083314	Sigsarve
L115	rör	6362577,4	717003,5	46,07	SN2067698	Sigsarve
L117	rör	6362529,9	716907,1	47,97	SN2067696	Sigsarve
L105	rör	6362462,2	716909,7	48,15	SN2067693	Sigsarve



Figur 17. Lokalisering av nivåloggrar inom områdena Sigsarve (vänster) respektive Bjärges (höger). Bakgrunden är baserad på höjddata där röd är högre nivå och blå lägre och de ljusa respektive mörka delarna motsvarar metersintervall.

Figur 18. a) Loggeruppsättning vid Bjärges. I fotot syns L118 som sänks ner i grundvattenröret samt L118b som sitter på kvastskaftet. **b)** Nerladdning av loggerdata vid L122, Bjärges. Foton: Oskar Henriksson (t.v.) och Peter Dahlqvist (t.h.).

RESULTAT

Dokumentation med drönare

Karstskrevor och karrenhålens längd och bredd

I figur 19 visas histogram och plottar som visar resultaten från mätningarna av karstens bredd och längd i de fyra pilotområdena. Observera att resultaten endast avser tolkade polygoner för karstskreva och karrenhål. Fördelningen av karstbredden för de olika områdena är likartad. Merparten av objekten är mellan 3 och 15 cm breda och medianbredden är i stort sett den samma i de fyra områdena (fig. 19).

Längden på karstobjekten är vanligtvis mellan 0,2 och 0,8 m. Antalet karstobjekt minskar successivt med ökad längd. Endast ett fåtal objekt har dokumenterats som är längre än fem meter. Det är vanligt att man beskriver förhållandet mellan antalet sprickor och dess längd i en specifik bergart med följande funktion [2]

$$N = aS^{-D} \qquad [2]$$

Där spricklängden betecknas med S och där N representerar antalet sprickor som har en längd större än eller lika med S. Variabeln a anger ett mått på provgruppens storlek. Variabeln D ("*fractal dimension*") beskriver hur många små i jämförelse med större sprickor som förekommer i gruppen. Ett högt D-värde innebär att det finns en relativt stor mängd små sprickor i gruppen. Denna funktion medför att sprickor som plottas logaritmiskt avseende längd (S) och antal (N) kommer att hamna på en rak linje där gradienten motsvarar D-värdet (Yielding m.fl. 1996).

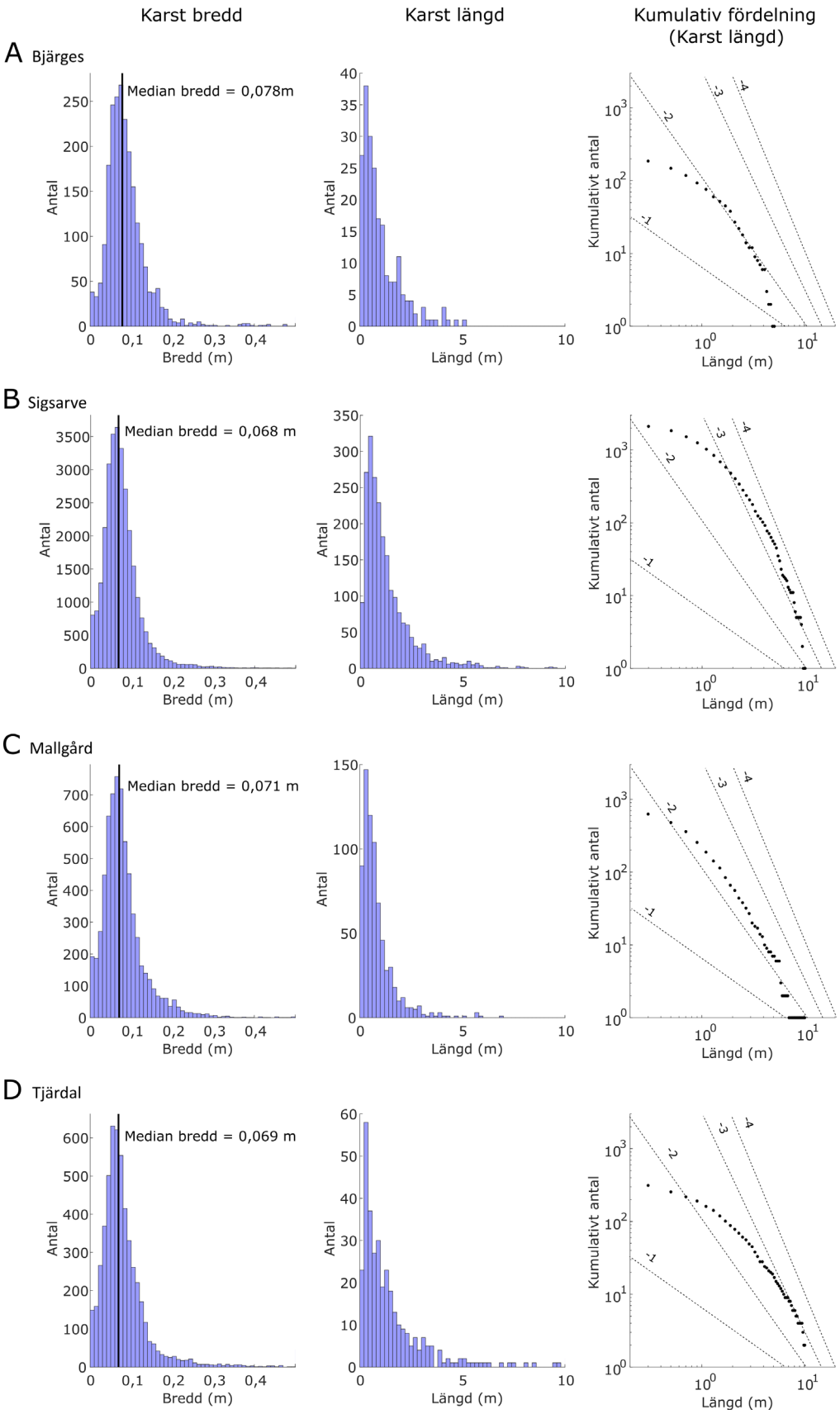
Den grafiska presentationen av våra data visar på en linjär trend med gradienter mellan -2 och -4. I jämförelse med data från sedimentära bergarter i Nordsjön med värden som ger gradienter mellan -1 och -2 (Yielding m.fl. 1996).

En tolkning till att våra data inte helt ligger linjärt kan vara att karststrukturen måste ha en viss storlek för att synas som karst. För att klassificera en struktur som en karstskreva eller karrenhål måste det vara över en viss storlek (ett hål över ett par centimeter). Det kurvformiga utseendet på de plottade datapunkterna (fig. 19) för långa karststrukturer kan vara orsakad av att karst inte förekommer längs hela sprickan. I stället observerar man kortare sektioner av karst som utvecklats längs sprickan. Därför, även om förekomst av karstskreva och karrenhål delvis är kopplad till ett befintligt spricksystem, noteras att deras längdfördelning representeras inte särskilt väl av en exponentiell funktion, som de underliggande sprickorna ofta har.

Karstskrevornas och växtlinjernas orientering

I figurerna 20–23 illustreras identifierade karstskrevor och växtlinjer samt hällytor. I figurerna visas även karsttätheten för de områden där mer än 20 % av 10x10-metersrutan utgörs av häll. Dessutom visas sprickrosor för strukturernas orientering i de fyra pilotområdena, baserade på både tolkade polygoner (karstskreva och karrenhål) och linjeobjekt (tolkade växtlinjer). Beräkningarna av karsttätheten visar att det över lag är mindre än en procent av hällytornas areal som består av öppen karst. De 10x10-metersrutor med störst andel karst finns i området Sigsarve (6,1 %) men i övrigt skiljer det sig inte speciellt mycket åt mellan de olika områdena (tabell 3).

I pilotområdet Bjärges har karsten en tydlig huvudriktning i västnordvästlig–ostsydostlig riktning (azimut 105°). Södra delen av området har en relativt större mängd karstskrevor och karrenhål. Här kan uppemot 2,5 % av hällarealen bestå av karst. I den norra delen av området förekommer det i stället fler växtlinjer.



Figur 19. Resultaten från statistisk analys av tolkade karstskrevor och karrenhål från de fyra drönarområdena A–D. Respektive områdes fördelning av bredd (vänster) och längd (mitten) samt kumulativt antal och längd (höger) för tolkade karststrukturer. Streckade linjerna i det högra diagrammet visar olika gradienter.

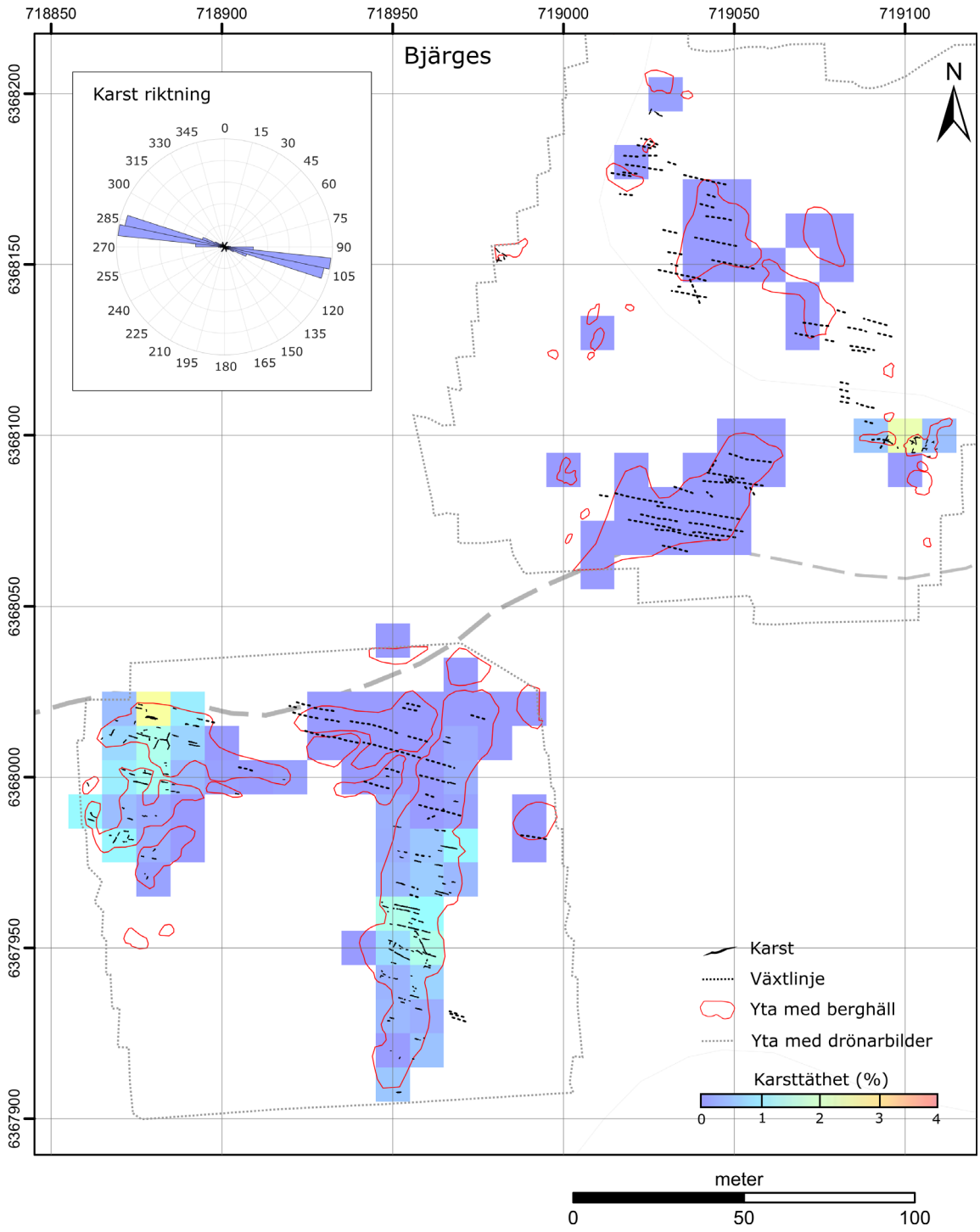
Tabell 3. Värdena från analysen av karst inom de fyra pilotområdena.

Område	Yta med karst (m^2)	Yta med berghäll (m^2)	Genomsnitt karsttäthet: över hela området (%)	Maximal karsttäthet: inom 10x10 m grid (%)
Mallgård	53	13 408	0,40	1,8
Bjärges	20	6 242	0,32	2,6
Sigsarve	228	28 133	0,81	6,1
Tjärdal	45	4 547	0,99	3,5

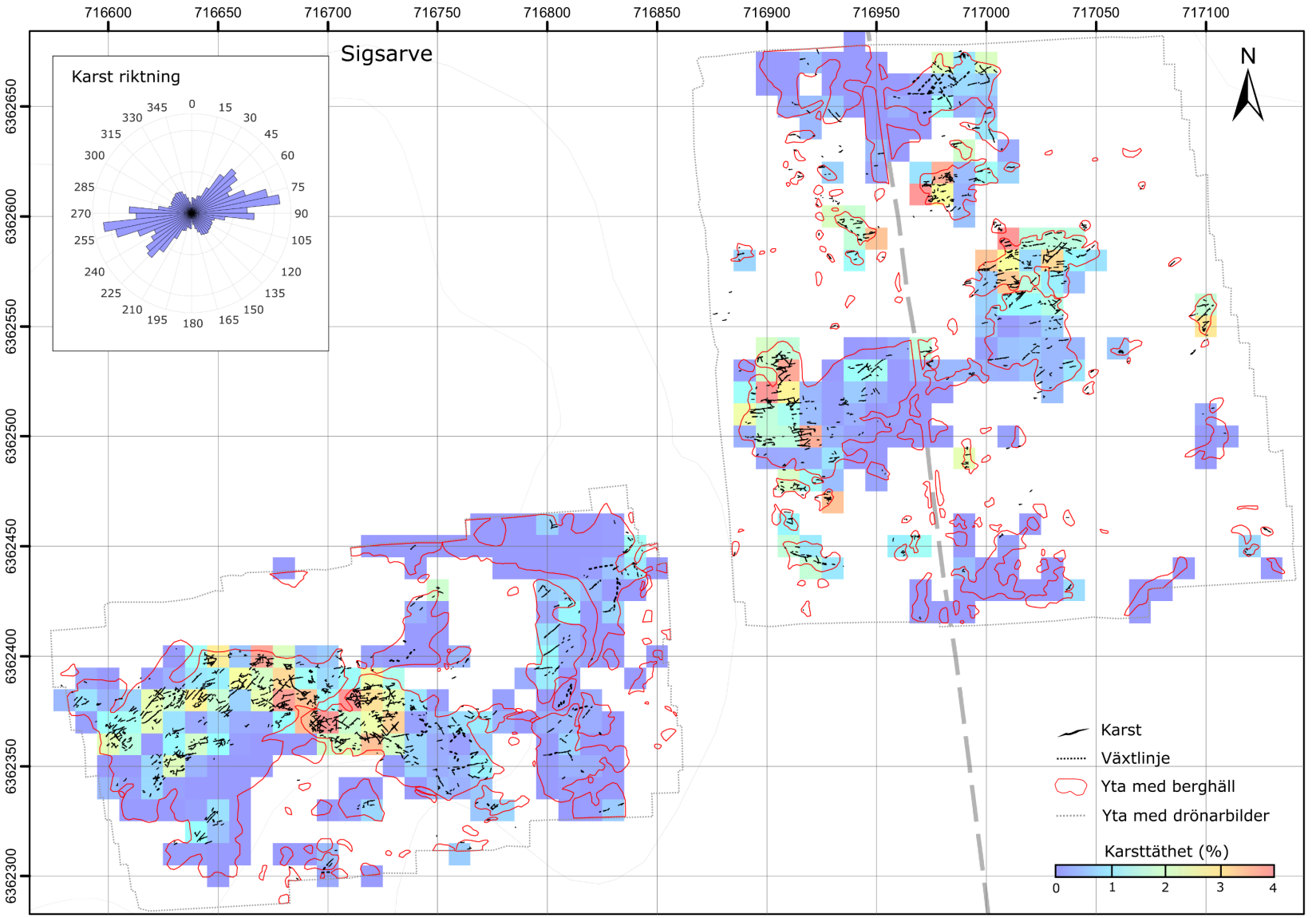
Sigsarve är det största pilotområdet. Här har också drygt 2 000 karststrukturer dokumenterats. Karststrukturerna har här tre dominerande riktningar; 75°, 45° och 95° (tabell 3). Karsttätheten är också relativt hög i förhållande till övriga områden (tabell 3). Karst verkar inte vara jämnt fördelad över hela området utan förekommer koncentrerat i 100x100 m och 30x30 m stora kluster. Mellan dessa kluster är karsttätheten ganska låg (< 1 %).

Merparten av området Mallgård består av hällytor där karst kan observeras. Karststrukturerna uppträder här i två huvudriktningar: 160° och 75°. En mindre tydlig tredje riktning är 95°. Generellt är karsttätheten störst i den västra delen av området. I den östra delen är det mest växtlinjer som observeras. Den genomsnittliga karsttätheten är 0,4 % och den maximala karsttätheten är 1,8 % i området (tabell 3).

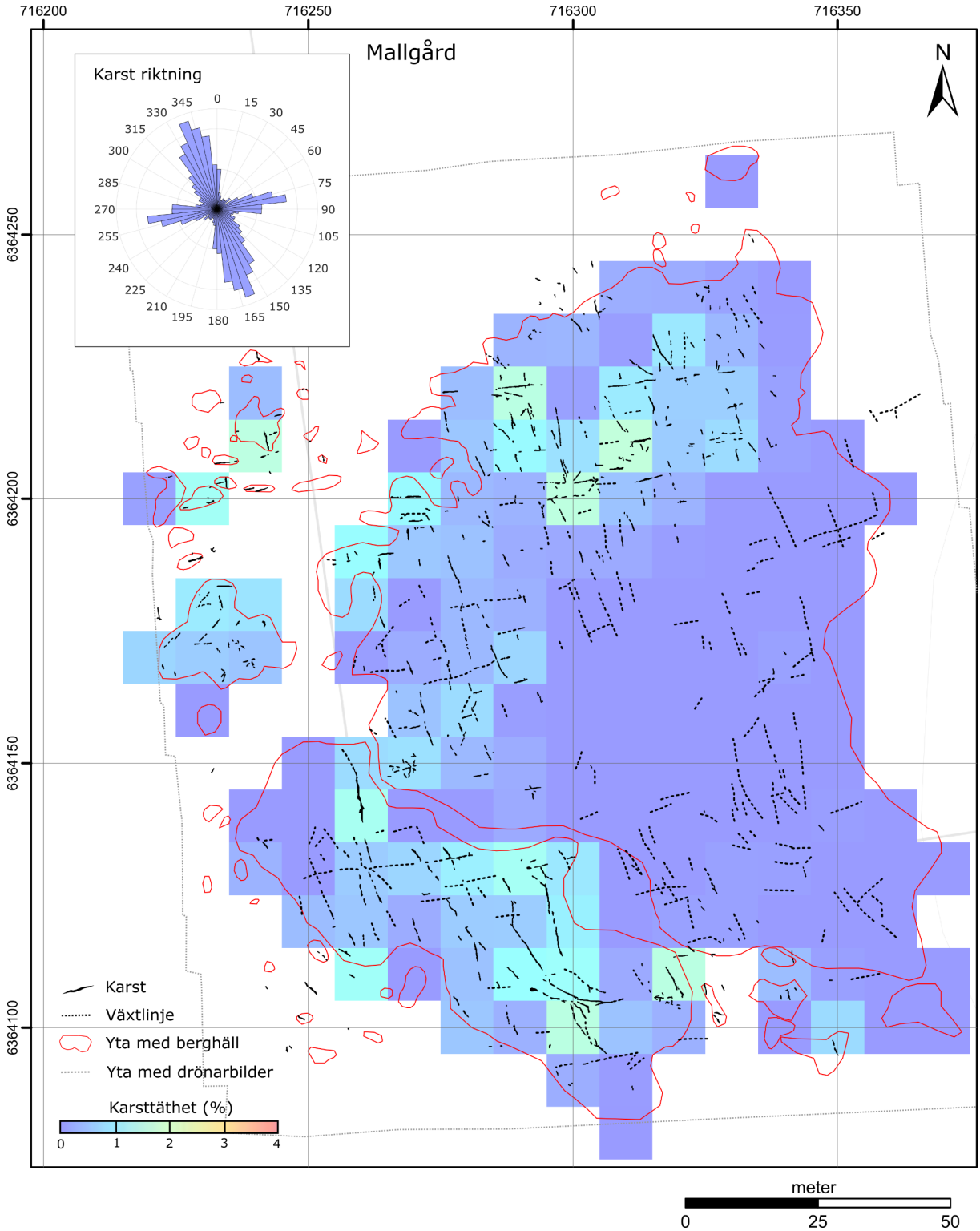
I området Tjärdal som är det minsta undersökta området som undersöktes, visar tolkningen två tydliga huvudriktningar: 75° och 45°. Ställvis inom området är det en relativt hög karsttäthet (3,5 %) och den genomsnittliga karsttätheten är cirka 1 % för hela området.



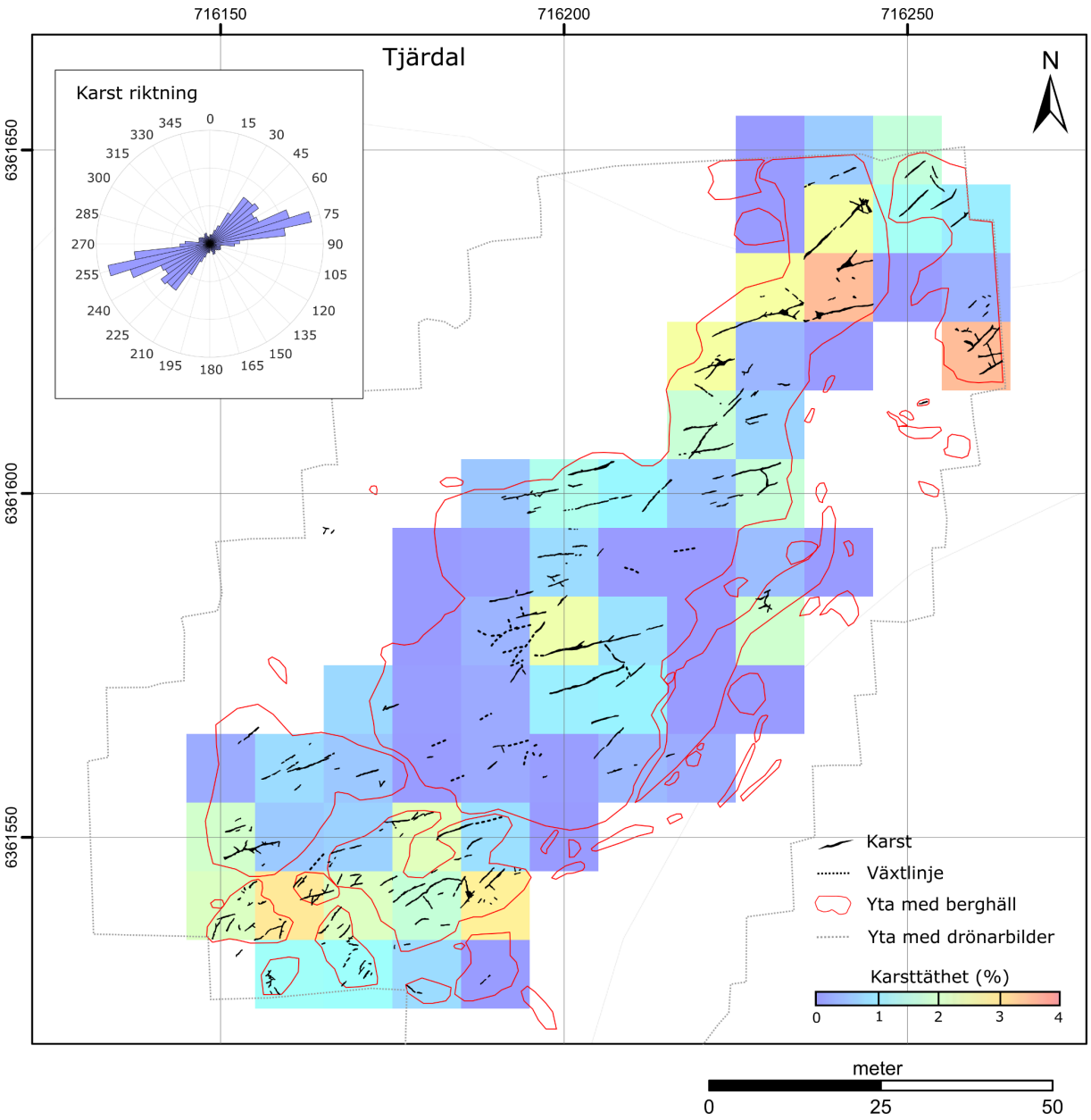
Figur 20. Karta som visar tolkningen av pilotområdet Bjärges. De gråa streckade linjerna visar drönarfotograferade områden. Röda polygoner visar tolkade hällområden. Tolkade växtlinjer och karst visas som svart streckad, respektive svarta linjer. De färgade rutorna anger beräknad karsttäthet i procent. Sprickrosen visar karststrukturernas orientering.



Figur 21. Karta som visar tolkningen av pilotområdet Sigsarve. De gråa streckade linjerna visar drönarfotograferade områden. Röda polygoner visar tolkade hällområden. Tolkade växtlinjer och karst visas som svart streckad, respektive svarta linjer. De färgade rutorna anger beräknad karsttäthet i procent. Sprickrosen visar karstrukturernas orientering.



Figur 22. Karta som visar tolkningen av pilotområdet Mallgård. De gråa streckade linjerna visar drönarfotograferade områden. Röda polygoner visar tolkade hällområden. Tolkade växtlinjer och karst visas som svart streckad, respektive svarta linjer. De färgade rutorna anger beräknad karsttäthet i procent. Sprickrosen visar karststrukturernas orientering.

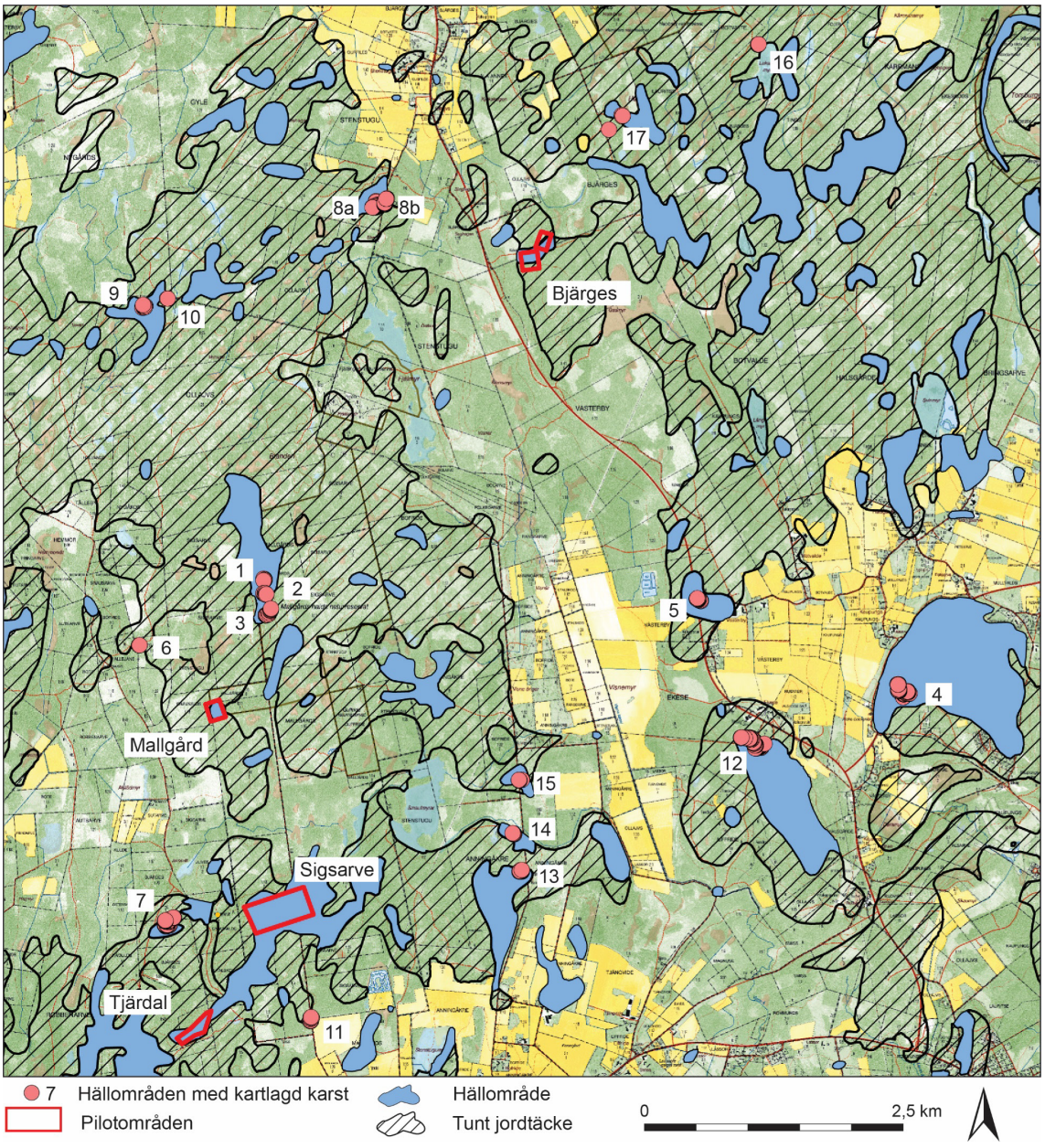


Figur 23. Karta som visar tolkningen av pilotområdet Tjärdal. De gråa streckade linjerna visar drönarfotograferade områden. Röda polygoner visar tolkade hällområden. Tolkade växtlinjer och karst visas som svart streckad, respektive svarta linjer. De färgade rutorna anger beräknad karsttäthet i procent. Sprickrosen visar karststrukturernas orientering.

Resultat från fältkartläggning

Under juni 2020 genomfördes under cirka två veckor kompletterande kartläggning av karst av hällområden som finns runt våra pilotområden. Arbetet utfördes av extrageologen Frans Lundberg. Från början var det tänkt en mer omfattande fältkartläggning av karst på mellersta Gotland, men på grund av covidrestriktioner kunde endast ett test av kartläggningsmetodiken göras. Syftet med kartläggningen var att få en kompletterande bild av förekommande karst runt våra pilotområden och testa fältmetodik för inmätning och klassificering.

Kartläggningen gjordes av hällområden inom ett cirka 40 km^2 stort område runt våra pilotområden (fig. 24). Totalt lokaliserades och kartlades 17 större hällområden med 235 karststrukturer (fig. 25). Eftersom det inte fanns tid för en heltäckande kartläggning gjordes merparten av observationerna på hällytor i anslutning till farbara bilvägar. Det gör att den genomförda kartläggningen inte är heltäckande för området. Samtliga kartlagda hällområden ligger mellan 31,5 och 55,2 m ö.h.



Figur 24. Översiktskarta med läget för de kartlagda hällområdena (1–17), pilotområdena, hällar och områden med tunt jordtäcke.

Inför fältarbetet gjordes en tolkning av ortofoton för att få en idé om var potentiella karst-hällområden finns. Ortofoton med en upplösning på cirka 0,16 m ger ofta en god bild av var det finns hällmark och större sprickor samt växtlineament som kan vara knutna till karst. Fältkart-läggningen verifierade att ortofoton ger en god bild av bredare och längre karstskrevor. Däremot är det i många fall svårt att särskilja karst från naturliga hak skapade av glacial erosion eller små brottkanter.

Vid fältkartläggningen mättes karststrukturerna in med hjälp av GPS (höjd över havet och koordinater). Längden och utsträckningen av uthålliga karstskrevor och växtlinjer registrerades med ett antal punkter utmed strukturen. Även djupet på strukturen mättes.

Den vanligaste kartlagda strukturen är karstskrevor med varierande vidd, djup och längd. Relativt vanligt är även decimeterstora avlånga håligheter och runda- eller ellipsformade gropar, så kallade kamenitzas. För flertalet av hällområdena identifierades färre än 10 karststrukturer. För områdena 4, 7, 8 och 12 var antalet avsevärt större (fig. 25) och för dessa gjordes även sprickrosor som indikerar riktningarna för karstskrevor och växtlinjer. För de kartlagda strukturerna skapades även en shapefil i ArcMap (exempel i fig. 25).

Vidden på de inmätta sprickskrevorna varierar från någon centimeter till flera decimeter. Merparten har en öppen bredd i markytan mellan 10 och 15 cm. Medelbredden är 13 cm. Djupet som uppmättes är vanligtvis 30–50 cm. Medeldjupet är 33 cm. Skrevorna är också i varierande grad fyllda med humus, löv och mossa. Orienteringen av sprickorna visar inte ett entydigt mönster, speciellt i jämförelse med resultaten från de drönarmätta pilotområdena. Man ska dock notera att antalet sprickor i pilotområdena är mycket större (tabell 4). Speciellt området vid Sigsarve har ett så stort antal att det helt dominerar den sammanlagda bilden av orienterings-riktningen. I Sigsarve dominerar karstvittrade sprickor i ostnordostlig riktning (cirka 75°). Samma riktning dominerar även i Tjärdalsområdet. I Mallgård däremot dominerar en nordnordvästlig

Kartlagt hällområde	Antal inmätta karststrukturer
Nr 1	5
Nr 2	9
Nr 3	6
Nr 4	25
Nr 5	8
Nr 6	4
Nr 7	32
Nr 8	74
Nr 9	5
Nr 10	2
Nr 11	9
Nr 12	38
Nr 13	8
Nr 14	2
Nr 15	3
Nr 16	2
Nr 17	3
Totalt	**235**

Exempel på inmätta strukturer från hällområde 12

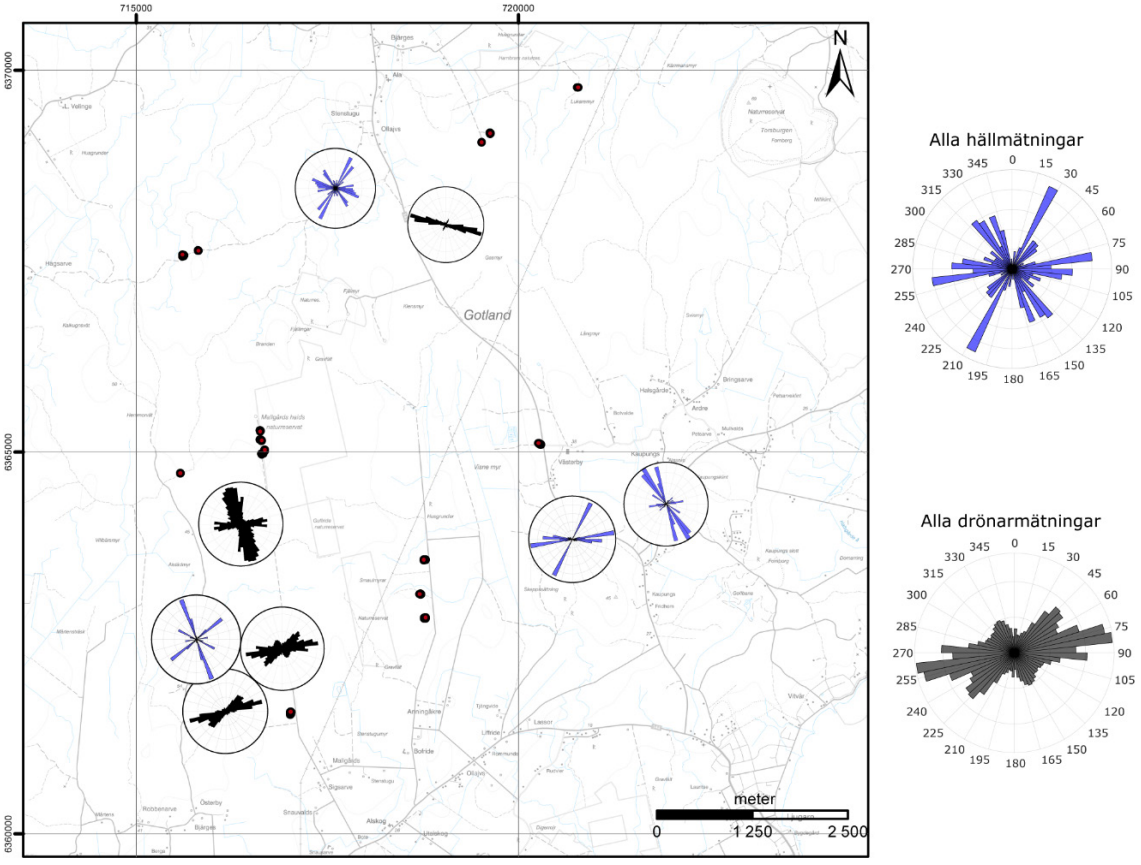
Figur 25. Fördelning av inmätta karststrukturer på de kartlagda hällytorna. Fotot till höger ger exempel på inmätta strukturer i hällområde 12.

riktning (cirka 330°). I Bjärges framträder ytterligare en riktning, nu med en västnordvästlig (cirka 280°) huvudriktning. De avsevärt färre inmätta karstskrevorna från fältkartläggningen visar en stor spridning av riktningarna (fig. 26). Vad man generellt kan se är att det finns 2–3 riktningar som återkommer men att det verkar som att det finns variationer som kan, förutom regionala tektoniska förhållanden, även vara kopplade till lokala betingelser i berggrundens som till exempel förekomst av revkroppar och lagring som ger olika förutsättningar för till exempel uppsprickning i samband med avlastning efter senaste glaciationen.

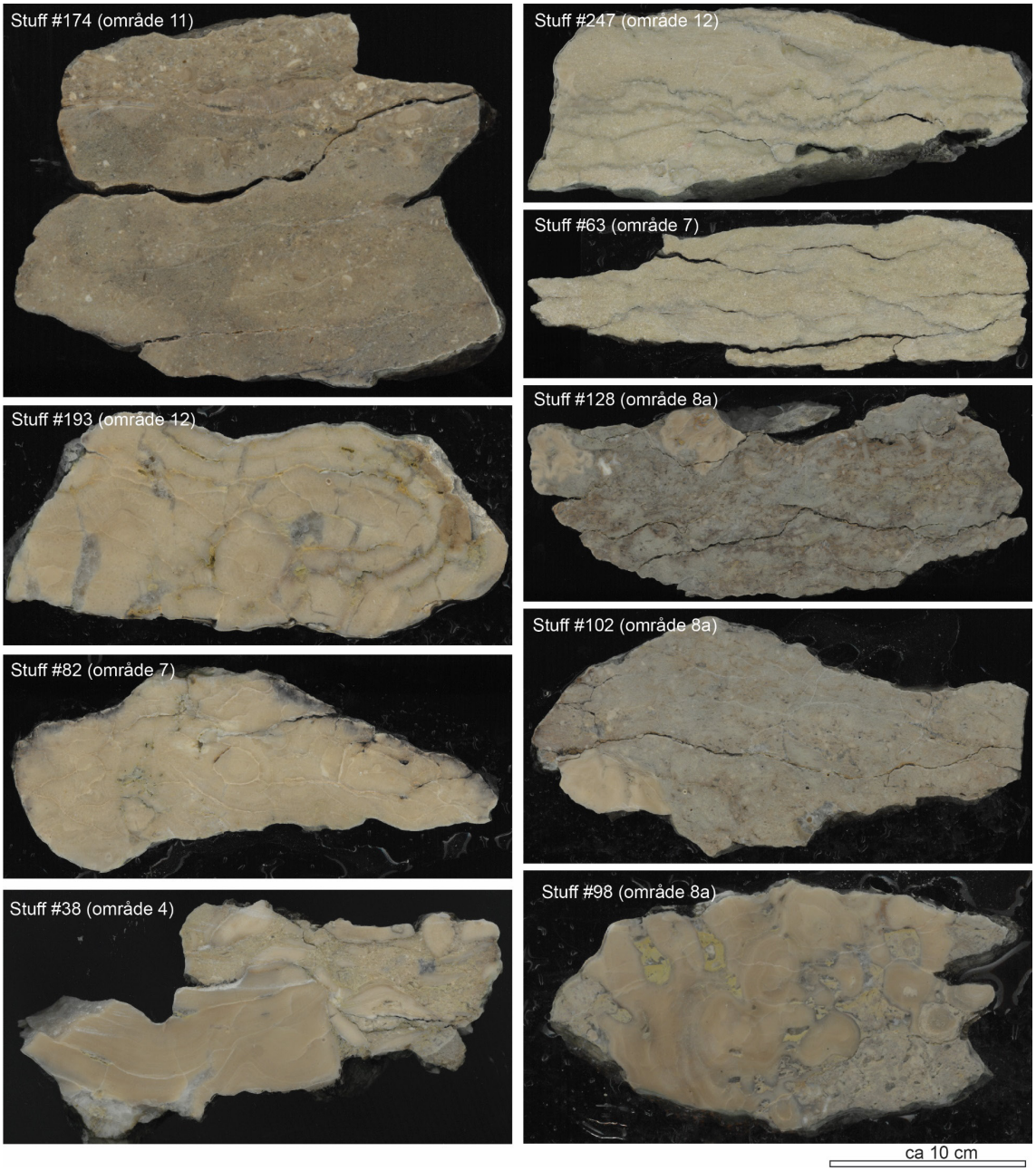
För att få en uppfattning av kalkstenens uppbyggnad i de karstvittrade hällområdena togs ett tiotal större bergartsprov. Proven togs i direkt anslutning till karstskrevor. Proven sågades och polerades för att få fram den texturella uppbyggnaden. Samtliga prov utgörs av kalkstenar med hög karbonathalt. De vanligaste förekommande kalkstenstyperna är beige-nougat-färgad

Tabell 4. Sammanställning av antalet inmätta och orienterade karststrukturer inom pilotområdena.

Pilotområde	Antal karstskrevor	Antal växtlinjer
Mallgård	758	199
Bjärges	215	93
Sigsarve	2 221	67
Tjärdal	352	26
Totalt	**3 546**	**385**



Figur 26. Figuren visar riktningen på de kartlagda karstskrevorna och riktningen på de polygonytor som mätts in från drönarkartläggningen av pilotområdena.



Figur 27. Sågade och polerade stuffer av kalkstenstyper som påträffas i anslutning till de kartlagda karsthällarna. Områdena är angivna i figur 24. Stuff 174: fragmentkalksten, stuff 247 och 63: biokalkarenit, stuff 193, 82 och 38: stromatoporoidé-kalksten, stuff 128, 102 och 98: stromatoporoidékalksten-revkalksten. Foto: Frans Lundberg.

medelkornig biokalkarenit och stromatoporoidékalksten. Den första typen består vanligtvis av < 10 cm tjocka, lagrade, rena, och jämnkorniga kalkstenar. Den kan egentligen liknas med en sandsten som bara består av karbonatpartiklar i sandstorlek. Exempel på dessa visas i figur 27 (stuff 247 och 63). Mellan de individuella lagren förekommer ofta tunna mörkfärgade undulerande och oregelbundna skikt med lermineral. Till viss del är dessa så kallade upplösningsytor skapade i samband med tryck- och temperaturomvandling av kalkstenen i samband med dess bildning.

Den andra typen av dominerande kalksten består av tjockare och mer oregelbundna lager med knölig kalksten. Knöligheten skapas av stromatoporoidéer, ett svampdjur som bygger massiva kalkskelett fastsittande på bottnen. De har en mycket hög karbonathalt och kännetecknas av beige-nougatfärgade skiktade centimeter- till flera decimeterstora knölar. Stufferna 38, 82 och 193 i figur 27 är typiska exempel. De bildar ibland uthålliga lager men oftast förekommer de

tillsammans med lagrade rena kalkstenar som till exempel biokalkarenit. Stromatoporoidéerna kan också bilda revkroppar och då förekommer de också ihop med rester från andra revbyggande organismer som bildar olika typer av fragmentkalkstenar. Dessa är vanligtvis mycket dåligt sorterade och gråare i färgen men fortfarande med en relativt hög karbonathalt (ex. stuff 98 och 102 i figur 26). Även oregelbundna lager med rena fragmentkalkstenar förekommer i de karstvittrade hällområdena (ex. stuff 174, figur 27).

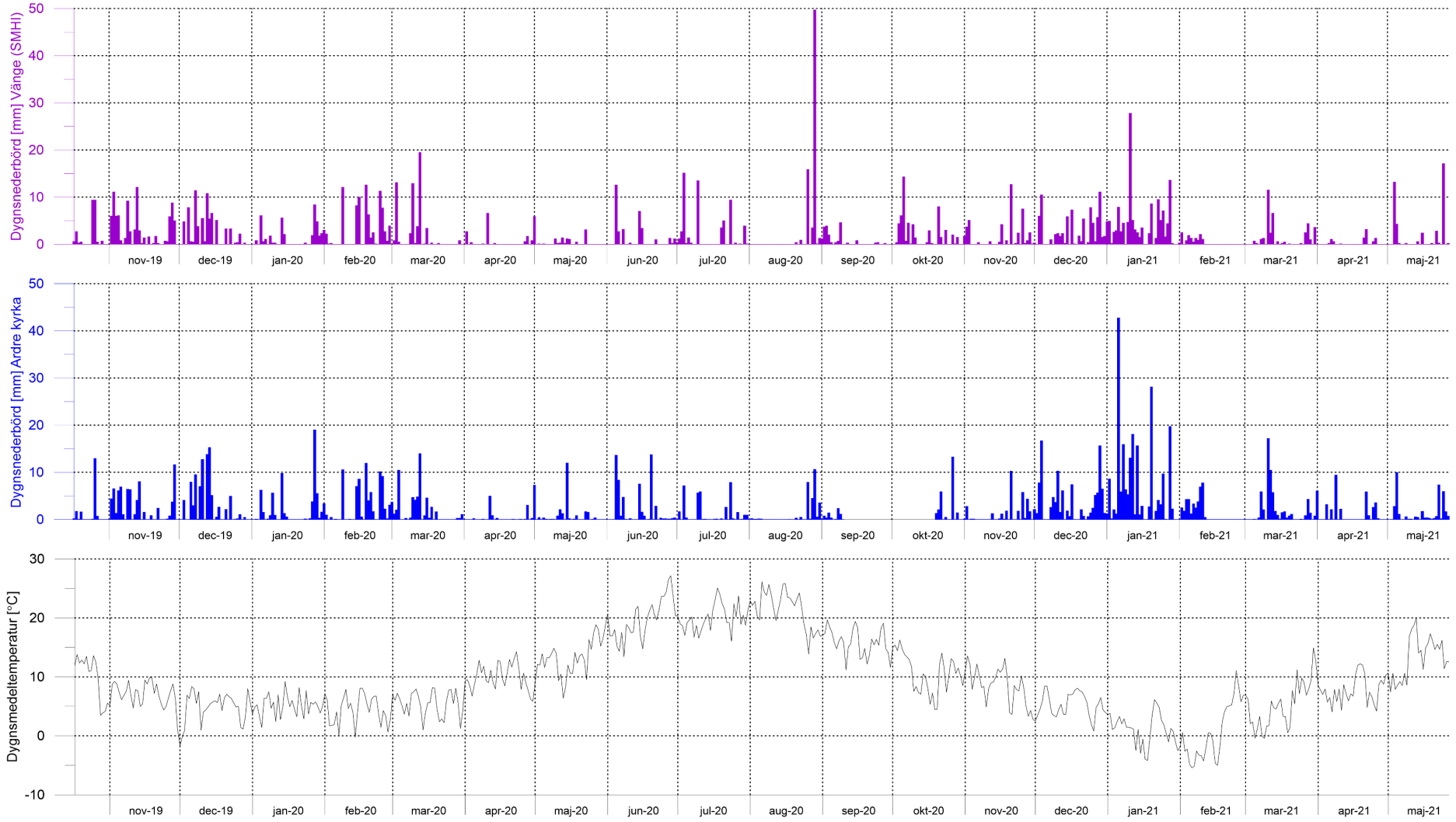
Beroende på lagring och kalkstenens textur får karstskrevorna mycket varierande form och utbredning på djupet. Oftast återspeglas variationer i lerhalt och textur i hur djupt karstvittringen når i sprickans väggar. Ofta följer karsten enskilda mer lättvittrade lager eller lagringsplan vilket ytterligare influerar epikarstens utseende på djupet (ex. fig. 9a, c).

Nederbörd – vattennivåer

Nederbördsdata från SGU:s väderstation i Ardre (se fig. 12) samt från SMHI:s väderstation i Vänge presenteras tillsammans med temperaturdata från Ardre i figur 28. Värt att notera är att väderstationerna, trots att de ligger endast cirka 14 km från varandra, ofta visar olika nederbördsmönster. Ett antal markanta nederbördshändelser har skett och de flesta syns vid båda väderstationerna, men mängden såväl som varaktigheten på nederbörden skiljer sig åt (fig. 28). Mätaren i Ardre var ur funktion mellan 2020-09-10 och 2020-11-12 på grund av ett tekniskt fel. Under januari och februari 2021 var det minusgrader vilket gör att nederbörden vid denna tidpunkt kan ha fallit som snö. Snö i nederbördsmätaren smälts och räknas därmed som nederbörd i stort sett samtidigt som den faller medan det i karstskrevor kan bli liggande i timmar, dagar eller till och med veckor om det är kallt. Detta skulle kunna påverka om den uppmätta nederbörden korrelerar eller ej med nivådata från tryckgivare utplacerade i karstsprickorna.

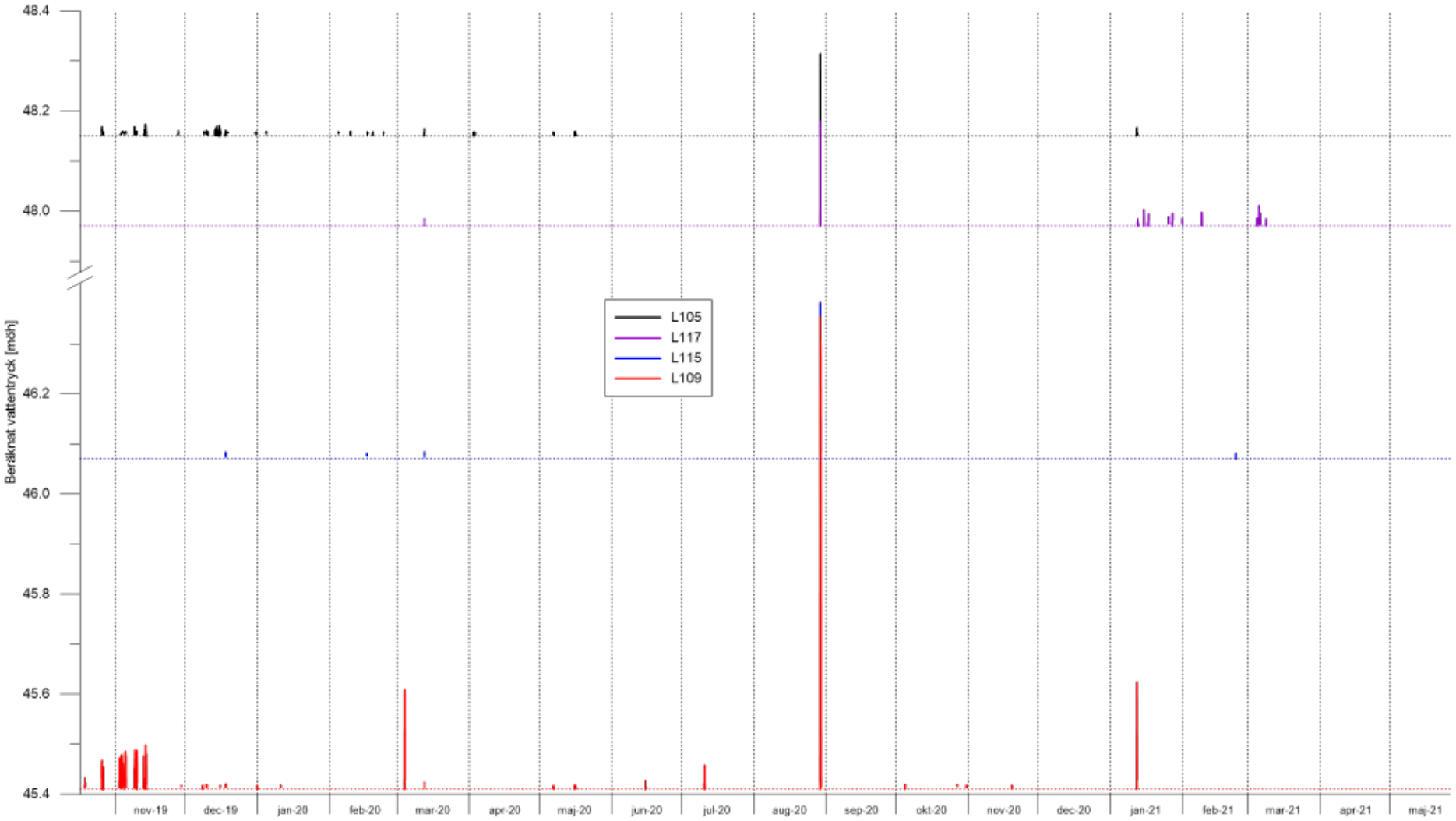
Data från utplacerade nivåloggrar presenteras i samlade diagram för Bjärges (fig. 29) och Sigsarve (fig. 30). När vattennivån går under trycksensorn i loggern kan det hänga kvar en vattendroppe som resulterar i ett registrerat tryck som är lägre än lufttrycket. Sådana negativa tryck är bortrensade från redovisningen. Om vattnet vid trycksensorn fryser kan det medföra ett högt registrerat tryck som inte avspeglar vattennivån vid loggern. Loggern vid L122 uppvisar ett antal tillfällen med högt tryck i februari–mars 2020 samt mars 2021 som kan misstänkas bero på sådan frysning. I Bjärges avspeglas nederbördsmönstret tydligare än i Sigsarve. Tryckmätare från Bjärges registrerar både fler event och även högre tryck samt längre varaktighet på tryckförändringarna (fig. 29). Responsen på nederbörden är med andra ord olika i de två områdena. I Bjärges är nivåförändringarna ofta mer än 10 cm och inte sällan 2–3 dm (fig. 29). Avsänkningen visar på ett långsamt förlopp vilket kan visa på att vattennivån står högt en längre period (någon vecka) efter nederbörd i området Bjärges. Responsen hos tryckgivarna i Bjärges liknar responsen som man ofta ser i fungerande grundvattenrör. I Sigsarve är de registrerade förloppen däremot kortvariga (endast några timmar, dagar, fig. 30). Oftast syns endast några centimeters höjning i tryckgivarna och påverkan försvinner lika fort som den kommer (fig. 30). Tolkningen är att vattnet som kommer ner i karstsprickorna i Sigsarve snabbt hittar en väg ifrån karstsprickan, antingen ner till ett djupare liggande grundvattenmagasin eller vidare lateralt till lägre partier i närområdet (jämför fig. 17), alternativt att vattnet i epikarsten i Sigsarve lagras på en nivå lägre än man lyckats installera nivåloggrar.

Den tydligaste händelsen i såväl Bjärges som Sigsarve var den 29 augusti 2020. Då reagerar samtliga nivåloggrar vilket kopplas till ett kraftigt regn med mycket vatten under kort tid (fig. 29, 30). För samma datum visar SMHI:s nederbördsdata från Vänge en dygnsnederbörd på 50 mm medan SGU:s nederbördsstation i Ardre endast visar på 12 mm i dygnsnederbörd (fig. 28). Denna nederbördshändelse syns även i några av SGU:s nationella nivåstationer som mäter grundvattenytan kontinuerligt, bland annat vid Tingstäde (öppet magasin i jordlager) där grundvattennivån höjs med nästan 50 cm under samma dygn (fig. 31).



Figur 28. Data från nederbördsstationer vid Ardre kyrka (SGU:s väderstation), vid Vänge (SMHI:s väderstation) samt dygnsmedeltemperaturen vid Ardre kyrka (SGU:s väderstation).

Figur 29. Data från nivåloggrar inom pilotområdet Bjärges.



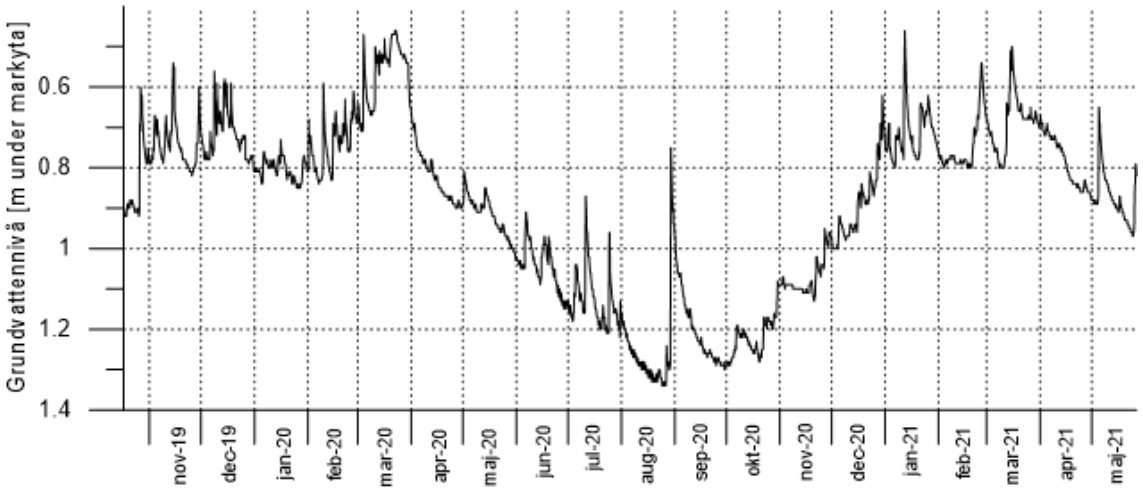
Figur 30. Data från nivåloggrar inom pilotområdet Sigsarve.

De nivåloggrar som sitter fritt i karstsprickorna, fastsatta på kvastskaft (L118b och 121), det vill säga inte i grundvattenrör, reagerar mer sällan än nivåloggrar som sitter i rör. Vid en jämförelse mellan L118b och L118 kan man se att det är relativt stor skillnad (fig. 29). Nivålogger L121 registrerar endast ett tillfälle, den 29 augusti 2020 då det var som kraftigast nederbörd under hela perioden (fig. 29). Det verkar som att vattennivåerna i karstsprickorna höjs vid nederbörd men sällan så mycket att vattnet flödar fritt över jordlagren i sprickorna. Det är stor skillnad i volym mellan att fylla porerna i jordlagren och volymen i en decimeterbred spricka. Det spelar därmed stor roll hur man installerar tryckgivarna. För att fånga upp annat än endast de största nederbördshändelserna rekommenderas att man sätter tryckgivarna i grundvattenrör och inte fritt i karstsprickorna.

L122 placerades i ett något avvikande område beväxt med ag som såg ut att ligga något lägre än övriga delar. Tanken var att detta område har höga grundvattennivåer och även vatten över marknivå tillfälligtvis. L122 flyttades cirka 15 m i november 2019, då det fanns risk för yttre påverkan, vilket dock inte verkat påverka registrering nämnvärt. L122 registrerar vid två tillfällen (slutet av mars 2020 samt tidigt i mars 2021) kraftiga tryckförändringar som inte registreras i övriga nivåloggrar, vilket anses bero på frysning (fig. 29, se diskussion ovan i detta avsnitt). Det är även tydligt att det står grundvatten i röret i princip hela perioden oktober–mars, både 2020 och 2021 medan det är torrt april till oktober 2020 (fig. 29).

Det har inte utförts någon detaljerad utvärdering och analys av tryckresponsen. Dock framgår några tydliga resultat. Tryckresponsen är betydligt större framför allt i Bjärges men även i Sigsarve, både till antal och magnitud, under oktober–mars än resten av året. Det är inte oväntat med tanke på att nederbörden är något större och temperaturen är lägre under denna period vilket medför en större effektiv nederbörd. I Bjärges finns också en skillnad mellan nivåloggrarna där framför allt L111, som är belägen lägst i området, visar att responsen är mer jämnt fördelat än hos övriga nivåloggrar.

Dessa resultat kan tolkas på minst två sätt som ger vitt skilda slutsatser. En tolkning kan givetvis vara att epikarsten framför allt påverkar grundvattenbildning till berg under den period då responser noterats. Epikarstens effekt för grundvattenbildning skulle annars vara mycket mer begränsad helt enkelt för att det inte finns vatten i dem under sommarhalvåret.



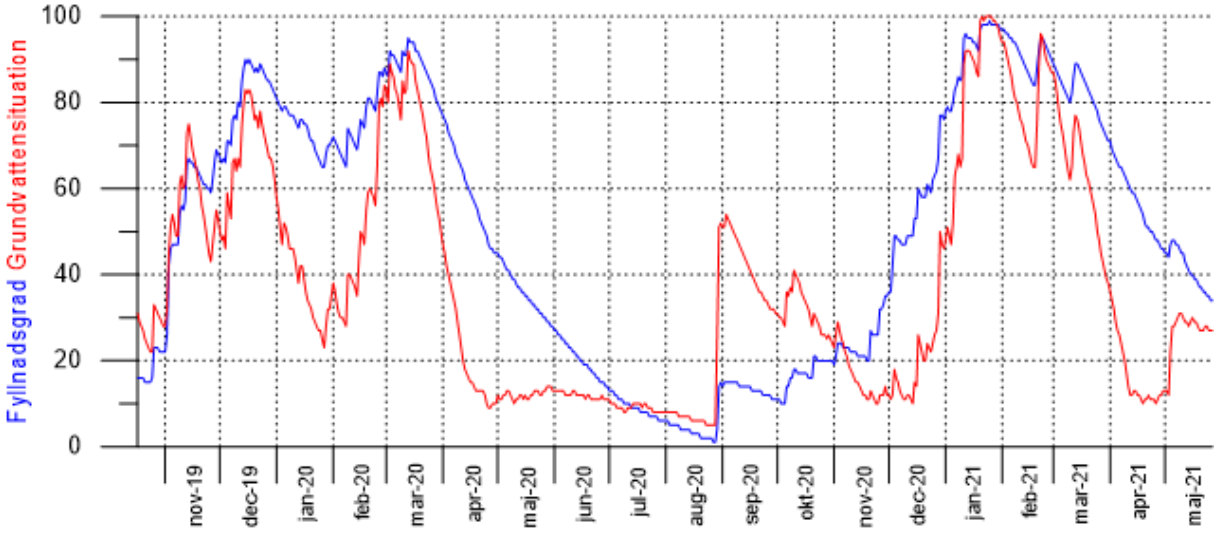
Figur 31. Data från SGU:s mätstation Tingsstäde_1 för samma period som det redovisas nivådata från nivåloggrar.

En alternativ tolkning är att vattennivåerna i epikarsten påverkas mycket av den generella grundvattennivån i området. Under vinterhalvåret är nivåerna generellt sett högre vilket syns i figur 31. Detta kan leda till en mindre vertikal drivkraft för flödet under vintern än under sommarhalvåret. Det vatten som samlas i epikarsten under vintern har därmed ett långsammare flöde ner i berget än under sommaren. Att L111 skiljer sig från övriga i Bjärges skulle kunna bero på att grundvattennivån inte har lika stor amplitud längre ner i lutningen som högre upp och skillnaden mellan sommar och vinter blir därmed inte lika påtaglig. Noterbart är att det förekommer tillfällen med grundvattenbildning på Gotland under maj– juli 2020 vilket syns tydligt i figur 31. Det skulle tala för att det har transporterats vatten i epikarsten i de övervakade områdena även under sommaren även om det inte har kunnat verifieras med tryckmätningar.

Denna tolkning skulle därmed i stället leda till slutsatsen att epikarsten framför allt får en stor betydelse för grundvattenbildning till berg under sommaren. I andra områden utan epikarst och med ett jordtäcke är det tänkbart att evapotranspirationen (summan av avdunstningen från mark och ytvatten) under sommarhalvåret är jämförelsevis mycket högre vilket därmed begränsar grundvattenbildningen väsentligt i dessa områden.

De enskilda tryckresponserna som observerats med nivåloggrar har inte analyserats i detalj, utan ytterligare resultat och slutsatser kan troligen tas fram från data vid framtida studier. En möjlig analys är att undersöka om recessionsförloppen skiljer sig åt vid olika tillfällen och perioder.

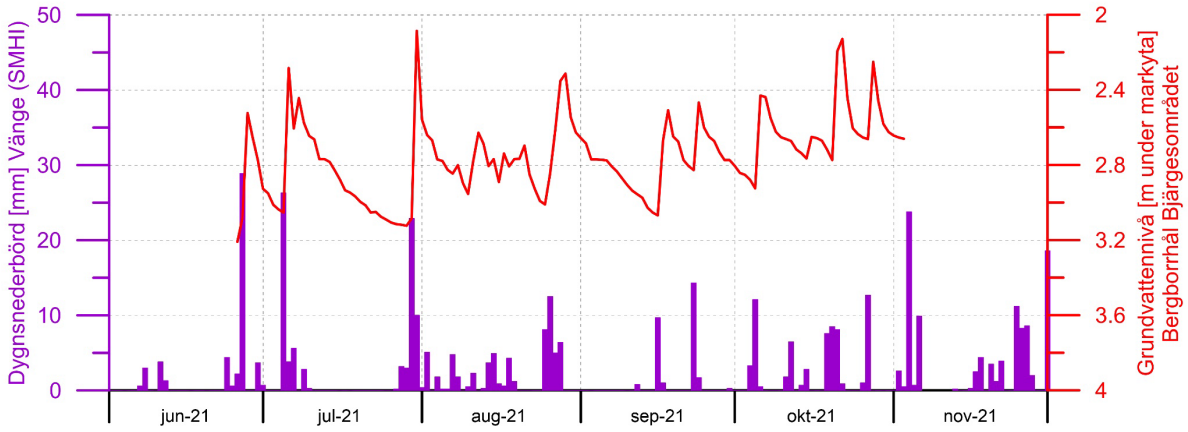
För att kunna jämföra de uppmätta grundvattennivåerna med hur den generella grundvatten-situationen såg ut på Gotland under samma period visar figur 32 data från SGU:s modellverktyg för fyllnadsgrad samt grundvattensituation för en 4x4 km stor yta i anslutning till pilotområdena Bjärges och Sigsarve. Fyllnadsgrad (0–100 %) visar modellerad grundvattennivå relativt samtliga beräknade nivåer för platsen oavsett årstid. En hög fyllnadsgrad visar därmed att grundvatten-nivån vid tillfället är närmare markytan jämfört med andra tidpunkter. Grundvattensituation (0–100 %) visar samma modellerade grundvattennivå men jämfört med andra beräknade nivåer för samma tid på året. För ytterligare beskrivning av fyllnadsgrad och grundvattensituation hänvisas till www.sgu.se/grundvatten/grundvattennivaer/om-grundvattennivaer. Under perioden april–augusti 2020 var det en relativt lång period då grundvattennivåerna var låga (mycket under de normala) för årstiden. I övrigt var grundvattensituationen ganska variabel under perioden, men



Figur 32. Data från SGU. Blå linje visar modellerad fyllnadsgrad hos små magasin och röd linje modellerad grundvatten-situation för området i anslutning till pilotområdena.

i sin helhet förväntad med hög fyllnadsgrad under vintern och lägre under sommaren. Dock sticker januari–februari 2021 ut med nivåer periodvis mycket över det normala för årstiden (fig. 32). Sommaren 2020 var ovanligt torr och januari–februari 2021 var ovanligt blöt.

I Bjärgesområdet finns ett borrhål i berg där Länsstyrelsen i Gotlands län har nivåövervakning. Tyvärr visade det sig att tryckmätaren var ur funktion hela perioden då det skett mätningar i karstsprickorna. Vid två tillfällen vid fältbesök mättes grundvattennivån i bergborrhålet för hand till 2,73 m (14/5, 2019) samt 2,40 m (24/3, 2021) under marknivå. Dock finns data från perioden efter våra mätningar och man kan se att grundvattennivåerna varierar mellan 3,2 och 2,1 m under markytan vilket är cirka 40,7 till 39,6 m ö.h. (fig. 33). Man ser även hur snabbt magasinet reagerar på nederbörd. Även om data saknas för samma period överensstämmer mönstren mellan nivåloggrar i Bjärges och i nämnda bergborrhål. Trycknivåer i karstsprickorna reagerar snabbt upp för att sedan gå ner på några dagar eller veckor medan nivåmätaren i borrhålet registrerar en något långsammare uppgång och en något längre tid, veckor eller månader för nedgången (jämför fig. 29, 33). En intressant sak man kan se är att det sker grundvattenbildning sommartid och att grundvattennivån faktiskt höjs från slutet av juni till oktober 2021 vilket är ovanligt för denna tidsperiod (jämför fig. 32). Tyvärr saknas data från karstskrevorna från denna period men man får anta att liknande mönster funnits tidigare år och att nederbörden sommartid oftast är för liten för att registreras i nivåloggrar i karstsprickorna.



Figur 33. Data från bergborrhålet i pilotområdet Bjärges. Markyta vid röret cirka 42,8 m ö.h.

DISKUSSION

Testerna med att dokumentera epikarst med drönare visar att det är möjligt att med relativt liten fältinsats få fram detaljerad yttäckande information om förekomsten och utseendet. Med stöd av GIS-applikationer och statistisk bearbetning ger dokumentationen värdefulla uppgifter om den relativa andelen öppna karstsprickor och orienteringen av dessa. Fältmätningen med drönare i de fyra pilotområdena omfattade cirka 18 hektar, tog tre dagar att göra och utöver detta behövdes ungefär lika lång tid med bearbetning av den insamlade informationen.

Drönartekniken lämpar sig dock bäst i öppen terräng. Vår drönardokumentation gjordes med en nominell flyghöjd på 20–25 m vilket bedömdes som lämplig höjd för att kunna se detaljer och även för att få ett hanterbart antal fotografier som skulle slås ihop för respektive område. Eventuellt skulle man kunna flyga något högre för att minska antalet foton och tiden det tar att dokumentera ett område. Vår bedömning var i huvudsak baserad på att drönaren skulle precis flyga över träden samtidigt som vi ville ha så hög upplösning som möjligt. Förslagsvis bör dock ytterligare test göras för att optimera flyghöjden i förhållande till upplösning, antal foton och tidsåtgång.

Vi bedömer också att man innan drönarmätningarna väljer ut lämpliga områden med stöd av ortofotokartor och SGU:s hälldatabas. Dessa har visat sig ge en relativt god bild av var det kan förekomma öppna hällmarker med karst. Mindre hällytor och områden med skog bör i stället dokumenteras manuellt. Även LIDAR-data kan vara ett hjälpmedel för att lokalisera områden där fältkontroll bör göras med drönare.

Beräkningar av de dokumenterade öppna karststrukturerna visar att de utgör ett par procent (2–6 %) av de blottade hällytorna i de undersökta områdena. Men för att kunna utvärdera om dessa resultat är representativa för ett större område krävs att fler karsthällmarker undersöks. Våra pilotområden är också delvis valda beroende på att det fanns tydliga karstskrevor här. Riktningarna på de öppna karststrukturerna tycks också vara lokalt betingade även om man kan förmoda att det finns regionala trender. I pilotområdena Sigsarve och Tjärdal dominerar ostnordostliga strukturer medan i Mallgård är riktningen huvudsakligen nordnordvästlig och i Bjärges ostsydostlig. Kompletterade hällkartläggning i området kring pilotområdena indikerar ytterligare spridning av riktningarna. En mer utbredd drönardokumentation kan sannolikt ge en bättre statistisk bild av riktningarna där inte enskilda områden med många sprickor får en för stor vikt i analysen.

En viktig frågeställning som finns är hur det ser ut under jordlagren. Påträffas epikarst i lika stor omfattning under jordlagren som i de angränsande hällområdena som vi undersökt? Växtlinjer med gräs, buskar och träd som kan kopplas till karstskrevor har vi observerat på flera platser på Gotland, framför allt i områden med mycket tunna jordlager som mestadels består av humus. Men hur det förhåller sig där vi har någon meter med sand, grus, lera eller morän på berggrunden är oklart. En bättre uppfattning om detta är viktigt för hur man ska beakta de insamlade uppgifterna från hällområden i relation till större markområden med både hällmark och jordlager, bland annat för att kunna undersöka epikarstens betydelse för grundvattenbildningen. För att få mer kunskap om hur djupt ner i berggrunden epikarsten går och var det finns karst under jordlager krävs såväl grävning som geofysiska mätningar med metoder som exempelvis VLF och georadar. Det har gjorts ett relativt stort antal mätningar med VLF och georadar på Gotland både av SGU och av Naturvårdsverket (Olofsson 2015, Olofsson & Eater 2015). Dessa indikerar vertikala geofysiska anomalier som kan tolkas som epikarst som sträcker sig ett flertal meter ner i berggrunden. Det är dock viktigt att verifiera dessa tolkningar med exempelvis grunda vinklade borrningar.

Det har sedan tidigare varit känt att epikarst finns främst inom kalkstensområden som ligger i högre terräng och att bildningen till viss del även varit kontrollerad av att dessa områden varit

landområden längst tid sedan senaste istiden. Flera indikationer tyder dock på att karsten utvecklats långt tidigare, kanske redan under paleogen tid när klimatet var avsevärt fuktigare och varmare än idag. Detta kan innebära att äldre karst i så fall även kan förekomma under denna nivå vilket bör undersökas vidare. Merparten av Gotland som ligger under 25 m ö.h. består dock huvudsakligen av områden med märgel och märgelsten som har mindre benägenhet att utveckla karst. Vi ser också att de kalkstenstyper som lättast påverkas av karstvittring är karbonatrika kristallina kalkstenar och att förekomsten av sprickor är det som väsentligen skapar förutsättningar för att karstifieringen ska få fäste. Sprickor bildade i spröda bergarter som till exempel homogena kalkstenar har också bäst förutsättningar för att bilda öppna transportvägar för vatten. I mjukare och lösare märgel och märgelsten blir sprickorna ofta självläkande och tätare. De karstvittrade kalkstenarna har ofta en så kallad sparitisk kristallstruktur där de enskilda kristallerna lätt påverkas av upplösning av kolsyran i det meteoriska vattnet. Kalkstenar som består av finkristallin karbonat så kallad mikrit och märgel/märgelsten är mindre benägna att bilda karst på grund av högre lerinnehåll. Vi ser också exempel på att kalkstenslagrens olika benägenhet att påverkas leder till mycket oregelbundna karststrukturer. Exempelvis kan epikarstzonen vara knappt en meter djup och sluta i kontakten till ett relativt ytligt liggande märgellager. I andra fall med homogenare lagrad kalksten kan zonen med epikarst sträcka sig flera meter neråt och även bilda djupa slukhål och grottsystem. SGU:s regionala berggrundskarta K 221 (Erlström m.fl. 2009) ger en översikt av var det huvudsakligen påträffas kalkstensdominerad berggrund och var det företrädesvis påträffas märgel. Kartan ger ett visst stöd till var man kan förmoda att karst förekommer men det bör göras ytterligare en analys av vilka kalkstenstyper som är mer benägna än andra att bilda karst.

En av de bidragande faktorerna till karstbildning i vissa områden är den hydrauliska gradienten. Modellering av hur den hydrauliska gradienten varierat sen isens tillbakadragande kan öka vår kunskap om hur och när karsten bildats. Havsytans basnivå har förändrats med tiotals meter ett flertal gånger och även den faktiska landhöjningen bör ha påverkat bildandet av karst. Likaså kan studier av den rådande hydrauliska gradienten i olika områden troligen förbättra vår kunskap om var karst har en påverkan på de hydrogeologiska förhållandena på Gotland. En viktig diskussionspunkt i framtida undersökningar är om och hur mänsklig påverkan i form av utdikning och bortledning av vatten, stora nivåsänkningar på grund av större grundvattenuttag och avsänkning kring stora kalkbrott påverkar karstsystemen och indirekt den rådande vattenbalansen i marken.

På Gotland finns en generell bild av att det finns bättre förutsättningar för grundvattenuttag i anslutning till större revkroppar eller zoner med revbildande kalksten. Denna kalkstenstyp är mer motståndskraftig vilket gör att det i gränsen mot mer lättvittrad kalksten kan skapas förutsättningar för till exempel doliner. Dolinbildning i dessa områden skulle kunna vara en förklaring till att dessa områden ofta har en något bättre grundvattentillgång. SGU:s tidigare resistivitetsundersökningar med SkyTEM (Dahlqvist m.fl. 2015, 2017), där områden med revkalksten tydligt avtecknas, gör att man relativt enkelt kan lokalisera dessa områden och söka efter doliner.

Hällområden med epikarst och områden med jordlager som delvis fyller upp eller helt överlagrar områden med epikarst har stor betydelse för grundvattenbildningen (se Berthelin & Hartman 2020). De flesta beräkningar och undersökningar berör områden med större karstbildning och ofta i varmare delar av världen. Martos-Rossilo m.fl. (2015) redovisar en infiltrationskoefficient på 38 % (medel) baserat på data från 51 undersökningar rörande grundvattenbildning i karstakviferer i sydvästra medelhavsregionen. Enligt nya preliminära beräkningar av SGU varierar grundvattenbildningen på Gotland stort, från områden med mindre än 200 mm/år till områden med strax över 400 mm/år (SGU 2021, den totala årsmedelnederbörden på Gotland varierar mellan 500 och 600 mm/år). I denna beräkning ingår bland annat nederbörd, jorddjup och jordart men inte eventuell förekomst av karst. Uppskattning av grundvattenbildning till berg på Gotland brukar bedömas till mellan 10 och 150 mm/år beroende på om bergarten är en lerig märgel (lägre värde) eller som i det senare fallet karstifierad kalksten (SGU 2005). En fråge-

ställning i detta projekt var hur man ska bedöma grundvattenbildningen i områden med ytlig karst. De undersökta områdena Bjärges och Sigsarve är kartlagda som områden med häll eller tunna jordlager. Dessa områden har i såväl SGU:s som konsulters beräkningsmodeller en lägre grundvattenbildning än områden med mäktiga jordlager. SGU har granskat fall där man ansatt att grundvattenbildningen till berg är lika stor som nettonederbörden i området. Ett exempel är vid ansökan för materialtäkt vid Klintebys (Svea hovrätt M 13523-19). Här har man resonerat kring att det sker en nästan hundraprocentig avrinning av nettonederbörden via det ytliga grundvattnet, i bergplintens ytliga karst, ner till ytvattenavrinning i dalen nedanför. Bidragande orsaker till den snabba grundvattenavrinningen har varit lutningen ner från bergplinten samt att epikarsten underlagras av tät märgel.

Annars bör man i områden med ytlig karst ansätta en högre grundvattenbildning än i områden utan karst. Anledningen är att karstsprickorna bedöms agera som stora porer eller sprickor i vilka vatten kan transporteras, magasineras och där det kan ske infiltration. Karstsprickorna utgör mellan 2 och 6 % av ytan i de undersökta områdena vilket är en hög siffra om man ser det som porositet i berg. Den totala por-sprickvolymen på Gotland har uppskattats vara 0,01–0,05 % men i områden med karst 0,1–0,3 % (SGU 2005). Det rör sig i båda fallen om en höjning med en tiopotens vilket är betydande för beräkningar av grundvattenbildningen. I samtliga undersökta sprickor finns det några decimeter med organogena jordlager och humus i botten. Dessa är viktiga för kvarhållande av vatten och möjlighet till grundvattenbildning. Hällområden med karst bör i detta hänseende kanske betraktas som områden med jordlager i stället. Skillnaden mot hällområden utan karst bedöms som stor då det i sådana områden är mycket låg grundvattenbildning på grund av att vattnet ofta rinner av direkt eller blir stående i lågpunkter, till exempel temporära våtmarker, utan att infiltrera till berg i någon större utsträckning. Man bör även fundera på hur man ska behandla områden med mäktiga jordlager och underliggande karstsprickor. Dessa områden kan eventuellt få en högre klassning när det gäller grundvattenbildning då de har både vattenhållande förmågan i jordlager och en hydraulisk kontakt med berggrunden.

Skillnaden i respons från nederbörden mellan områdena Bjärges och Sigsarve kan bero på flera faktorer; dels huvudsaklig sprickriktning, dels topografi. I Bjärges där responsen är tydligare men långsammare är den huvudsakliga sprickriktningen (ostsydost) tvärs den topografiska lutningen (nordnordväst) medan karstsprickorna i Sigsarve, där responsen var snabbare och mindre talrika, har en huvudsaklig sprickriktning (ostnordost) som är ungefär samma som den topografiska lutningen (jämför fig. 17, 26). Karstsprickorna med nivåloggrar ligger även något olika i förhållande till topografin i de båda områdena. De undersökta karstsprickorna i Bjärges ligger relativt lägre i den lokala topografin än karstsprickorna i Sigsarve (fig. 17). Dessa båda förhållanden skulle kunna tolkas som att den laterala avrinningen skulle vara större i Sigsarve än i Bjärges vilket skulle tala för att epikarsten skulle ha en större betydelse för grundvattenbildningen till berg Bjärges.

En faktor som kan ha betydelse för den generella skillnaden i responsen mellan Bjärges och Sigsarve kan vara den hydrauliska förbindelsen mellan epikarst och djupare spricksystem (jämför till exempel figur 11) vilket inte varit möjligt att undersöka med nu tillämpade metoder. En snabb respons skulle därmed också kunna tolkas som en snabb vertikal transport ner i berget vilket då skulle tala för en större grundvattenbildning till berg i Sigsarve än i Bjärges.

Den relativa avsaknaden av responsen under sommarhalvåret jämfört med vintern samt skillnad mellan Bjärges och Sigsarve kan som diskuterats ovan leda till olika tolkningar. Det kan tolkas som att epikarsten framför allt har en stor påverkan på grundvattenbildning till berg under vinterhalvåret i Bjärges. Men det kan lika gärna tolkas som att effekten av epikarst för grundvattenbildning till berg är mest betydelsefull för Sigsarve och under sommarhalvåret för Bjärges. För att utreda denna fråga krävs kompletterande fältobservationer och analyser. Detta visar på ytterligare faktorer att inkludera när man ska göra en korrekt bedömning av grundvattenbildning i ett

område. Exempel på kompletterande fältförsök och analyser för att vidare utreda epikarstens betydelse för grundvattenbildningen till berg skulle kunna vara:

- Grävning och geofysiska mätningar för att se om och var det finns karst under jordlagren på Gotland.
- Utökade manuella observationer av flöden under perioder med hög vattenyta och under nederbördstillfällen både under vinterhalvåret och sommarhalvåret.
- Infiltrationsförsök med stor vattenvolym under sommarhalvåret för att okulärt bedöma om det huvudsakliga flödet är lateralt eller vertikalt från epikarsten. Försöket kan eventuellt kompletteras med spårämnen.
- Utöka nivåloggning med vinklade bergborrhål för korrelationsanalyser mellan vattennivåer i karst och tryckresponser i berg. Kan också användas för spårämnesförsök.
- Utökad analys av redan registrerade tryckresponser för att se på skillnader i responstid och recessionsförlopp.
- Detaljerad avrinningsanalys baserad på högupplöst höjddata för att bedöma hur stor del av nederbörden som passerar (rinner ner i) en karstspricka på vägen ut från respektive område.
- Beräkning av skillnader i evapotranspiration mellan område med tunt jordtäcke och epikarst och område med mäktigare jordtäcke.

SLUTSATSER

- Testen med drönare har gett positivt resultat rörande effektiv dokumentation av ytlig karst.
- Dokumentation av karst i pilotområdena har ökat kunskapen om epikarstens utseende och uppträdande.
- Mätningar av trycknivåer i grundvattenrör i karstskrevor har gett värdefull kunskap om hur karsten interagerar med nederbörd. Vissa karstsprickor håller vatten en längre tid medan andra dränerar vatten snabbt vidare i sidled eller ner genom berggrunden. Faktorer som styr hur snabbt karstsprickorna dräneras kan bland annat inkludera topografi, sprickriktning relativt marklutning, karstsprickornas hydrauliska förbindelse till djupare liggande spricksystem och grundvattennivåer.
- Epikarsten på Gotland är vanligtvis en till två meter djup och dess djupgående begränsas ofta av förekomsten av tätare och lerigare kalkstenslager.
- Det meteoriska vattnet i epikarsten bedöms relativt ytligt länkas av utmed lagringplan och tränga fram i lägre liggande terräng. Detta kan i vissa fall skapa förutsättningar för bildandet av temporära våtmarker vilket observerats i pilotområdet Bjärges.
- Tryckmätningar i karstskrevorna visar på att nederbörd kan främja grundvattenbildning till berg i karstmiljöer. Baserat på våra mätningar och analyser kan vi dock inte se om det har störst relativ betydelse under sommar- eller vinterhalvåret.
- Förstudien visar också på behovet av mer fördjupade hydrogeologiska studier av flöden i epikarst, hängande magasin i den omättade zonen och deras koppling till grundvattennivåer och grundvattenbildning till berggrunden.
- En fördjupad studie bör även inkludera fortsatt arbete med fältobservationer, analys och modellering angående förekomst av karst under jordlagren, vilka kalkstenstyper som är mer benägna att bilda karst, hur den hydrauliska gradienter påverkar bildningen av karst samt hur utdikning och bortledning av vatten med grundvattennivåsänkningar som följd kan påverka karstsystemen och indirekt den rådande vattenbalansen i marken.
- En systematisk insamling och databasuppbyggnad av karstförekomsterna på Gotland behövs också för att få ett bättre statistiskt underlag för bedömningar av hydrogeologiska förhållanden som grundvattenbildning och sårbarhet samt känsliga karsthällmarker. Arbetet bör omfatta diskussioner och beslut om rutiner och datavärdskap för denna typ av data.

REFERENSER

Berthelin, B. & Hartman, A., 2020: The shallow subsurface of karst systems: Review and directions. I Bertrand et al. (eds) *Eurokarst 2018, Besancon, Advances in Karst Science*. Springer Verlag. ISBN978-3-030-14014-4.

Borzenkova, I., Zorita, E., Borisova, O., Kalniņa, L., Kisielienė, D., Koff, T., Kuznetsov, D., Lemdahl, G., Sapelko, T., Stančikaitė, M. & Subetto, D., 2015: Climate change during the Holocene (past 12 000 years) I H.J. Bolle, M. Menenti, S al Vesuvis & S.I. Rasool (eds) *Second Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin,* 25-44, Springer Verlag. DOI 10.1007/978-3-319-16006-1.

Calner, M., 2002: A lowstand epikarstic intertidal flat from the middle Silurian of Gotland, Sweden. *Sedimentary Geology 148*, 389–403.

Cherns, L., 1982: Paleokarst, tidal erosion surfaces and stromatolites in the Silurian Eke Formation of Gotland, Sweden. *Sedimentology 29*, 819–833.

Dahlqvist, P., Triumf, C.-A., Persson, L., Bastani, M., Erlström, M., Jørgensen, F., Thulin Olander, H., Gustafsson, M., Thorsbrink, M., Schoning, K. & Curtis, P., 2015: SkyTEM-undersökningar på Gotland. *Rapporter och meddelanden 136*. Sveriges geologiska undersökning, 108 s.

Dahlqvist, P., Triumf, C.-A., Persson, L., Bastani, M., Erlström, M. & Schoning, K., 2017: SkyTEM-undersökningar på Gotland, del 2. *Rapporter och meddelanden 140*. Sveriges geologiska undersökning, 135 s.

de la Rosa, J.P.MI., 2016: The Burren: a glacial, karstic and biokarstic expression of a limestone plateau in western Ireland. *Earth Surface Processes and Landforms 31*, 1614–1628.

de la Rosa, J.P.MI., Warke, PA. & Smith, BJ., 2012: Microscale biopitting by the endolithic lichen Verrucaria baldensis and its proposed role in mesoscale solution basin development on limestone. *Earth Surface Processes and Landforms 37*, 374–384.

Engh, L., 1980: Lummelundagrottan med tillhörande karstområde. *Svenska grottor 3, Sveriges speleologförbund,* 290 s.

Eriksson, M.J., 2004: Formation and significance of a middle Silurian ravinement surface on Gotland, Sweden. *Sedimentary Geology 170*, 163–175.

Erlström, M., Persson, L., Sivhed, U. & Wickström, L., 2009: Beskrivning till regional berggrundskarta över Gotlands län. *Sveriges geologiska undersökning K 221*, 60 s.

Ford, D. & Williams, P., 2007: *Karst Hydrogeology and Geomorhology*. Wiley. DOI:10.1002/9781118684986.

Frykman, P., 1985: Subaerial exposure and cement stratigraphy of a Silurian bioherm in the Klinteberg Beds, Gotland, Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar 107*, 77–88.

Glimskär, A., Kindström, M., Lundin, A. & Jacobson, A., 2015: Metodik för inventering av fukthedar och hällmarkstyper på biogeografisk nivå. *Sveriges lantbruksuniversitet, rapport*, 52 s.

Glimskär, A., Kindström, M., Lundin, A., Björkén, A., Nilsson, B & Jonsson, O., 2018: Inventering och utveckling för uppföljning av gräsmarks- och hällmarksnaturtyper 2017. *Sveriges lantbruksuniversitet, rapport*, 82 s.

Goldscheider, N., 2012: A Holistic approach to groundwater protection and ecosystem services in karst terrains. *AQUA mundi Am06046*, 117–124. DOI 10.4409/Am-046-12-0047.

Helldén, U., 1974: Karst. En studie av Artfjällets karstområde med jämförande korrosion-analyser från Västspetsbergen och Tjeckoslovakien, *Meddelanden från Lunds universitets Geografiska Institution, Avhandlingar LXXII*.

Hjerne, C., Thorsbrink, M., Thunholm, B., Andersson, J. & Dahlqvist, P., 2021: Hydraulisk konduktivitet i Sveriges berggrund. *SGU-rapport 2021:09*. Sveriges geologiska undersökning, 72 s.

Jones, W.K., 2013: Physical structure of the epikarst. *Acta Carsologica 42*, 311–314.

Jordbruksverket, 2003: Indikatorarter – metodutveckling för nationell övervakning av biologisk mångfald i ängs- och betesmarker. *Jordbruksverket rapport 2003:1*, 88 s.

Koit, O., 2018: Distribution and development conditions of karst phenomena in Estonia. *Dynamiques environnementales, Journal international de géosciences et del'environnement 42*, 292–299.

Linné, C. von, 1741: Carl Linnæi Öländska och gotländska resa på riksens höglovlige ständers befallning förrättad år 1741. Red. av Carl-Otto von Sydow; ill. av Gunnar Brusewitz. Wahlström & Widstrand, 1977, 389 s.

Lundevall, G.F., 1965: Karst phenomena in the Lummelunda area of Gotland. *Geografiska Annaler 47*, 45–60.

Olofsson, B., 2015: VLF-mätningar Branings haid. *Aquater rapport*, 14 s.

Olofsson, B. & Earon, R., 2015: Geofysiska mätningar vid Bunge Ducker 1:64 och dess gränser mot Natura 2000-områdena Bräntings haid, Bästeträsk och Gildarshagen. *Environmental Innovation AB rapport,* 36 s.

Persson, P. O., 1963: En nyupptäckt grottlabyrint i västra Blekinge. *Geologiska Föreningens i Stockholm förhandlingar 85,* 266–273.

Persson, D., 2009: *Balsbergsgrottan – Historia, historier, forskning och grävning*. JM Förlag, 88 s.

Munthe, H., Hede, J.E. &Von Post, L., 1925: Gotlands geologi - En översikt. *Sveriges geologiska undersökning C 331,* 130 s.

Naturvårdsverket, 2011: Karsthällmarker. Uppspruckna kalkstenshällmarker. EU-kod 8240. *Vägledning för svenska naturtyper i habitatdirektivets bilaga 1 NV-04493-11*, 9 s.

SGU, 2005: Gotlands kommun, Visby vattenförsörjning, revidering av skyddsområde för Visby – Vibble vattentäkter. *Sveriges geologiska undersökning - Uppdragsrapport författad av A. Carlstedt*. Dnr: 08-1285/2003.

Sjöberg, R., 1975: Grottområdet vid Övre Ältevattnet. *Svenska Grottor 2. Sveriges Speleologförbund.*

Stocklassa Palmlöv, C., 2015: Kartering av karst på Gotland med LIDAR – en metodstudie. *Examensarbete i naturgeografi, Stockholms universitet*, 40 s.

Svantesson, S-I., 1976: Granulometric and petrographic studies of till in the Cambro-Silurian area of Gotland, Sweden, and studies of the ice recession in northern Gotland. *Striae 2*, 80 s.

Svenonius, F., 1910: Bjurälfdalens karstlandskap i norra Jämtland. *Sveriges Natur årsbok*, 73–81.

Tell, L., 1963: Karstförekomster i Sverige. *Arkiv för svensk grottforskning 12*, 62 s.

Thorsbrink, M., Dahlqvist, P., Holgersson, B. & McCarthy, J., 2016: Geologins betydelse för grundvattenberoende ekosystem. *SGU-rapport 2016:11*. Sveriges geologiska undersökning, 46 s.

Veress, M., Telbiz, T., Toth, G., Lóczy, D., Ruban, D.A. & Gutak, J. M., 2019: *Glaciokarst*. Springer, 501 s.

Von Knorring, R., 2013: Undersökning av karstvittring inom Kristianstadslättens NV randområde och bedömning av dess betydelse för grundvattnets sårbarhet. *Examensarbete i geologi vid Lunds universitet 432*, 30 s.

Waltham, A.C. & Fookes, P.G., 2005: Engineering classification of karst ground conditions. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology 36*, 101–118.

Williams, P.W., 2008: The role of epikarst and cave hydrogeology – a review. *International journal of speleology 37*, 1–10.

Yielding, G., Needham, T. & Jones, H., 1996: Sampling of fault populations using sub-surface data: a review. *Journal of Structural Geology 18*, 135–146.

Åkerman, J., 1995: Hörviksgrottan, en svåråtkomlig speleologisk sevärdhet i sydvästra Blekinge. *Blekinges Natur*, 13–27.